N° d'ordre 2007-ISAL-0006 Année 2007

Thèse

Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie

Présentée devant
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Formation doctorale : Génie Civil
Ecole doctorale : MEGA

Par
Talal SALEM
Ingénieur de la faculté de Génie I de l'Université Libanaise
DEA de Génie Civil de l'INSA de Lyon

Soutenue le 19 janvier 2007 devant la commission d'examen

Jury MM.

Rapporteur	A. MOURTADA	Professeur (Université Libanaise)
Examinateur	D. MAYER	Professeur (Mines Paris)
Président	J.J. ROUX	Professeur (INSA de Lyon)
Rapporteur	M. SANTAMOURIS	Professeur (Université d'Athènes)
Directeur	P. MICHEL	Docteur habilité (ENTPE)
Examinateur	S. KHERROUF	Ingénieur (ADEME)

Cette thèse a été préparée au Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et Bâtiment (DGCB), URA CNRS 1652

2006

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
	CHIMIE DE LYON Responsable : M. Denis SINOU Insa : R. GOURDON	Denis SINOU Université Claude Bernard Lyon 1 Lab Synthèse Asymétrique UMR UCB/CNRS 5622 Bât 308 2ème étage 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.44.81.83 Fax : 04 78 89 89 14 sinou@univ-lyon1.fr
E.E.A.	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** M. Daniel BARBIER	M. Daniel BARBIER INSA DE LYON Laboratoire Physique de la Matière Bâtiment Blaise Pascal 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43.64.43 Fax 04 72 43 60 82 Daniel.Barbier@insa-lyon.fr
E2M2	**EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION** **http://biomserv.univ-lyon1.fr/E2M2** M. Jean-Pierre FLANDROIS Insa : S. GRENIER	M. Jean-Pierre FLANDROIS UMR 5558 Biométrie et Biologie Evolutive Equipe Dynamique des Populations Bactériennes Faculté de Médecine Lyon-Sud Laboratoire de Bactériologie BP 1269600 OULLINS Tél : 04.78.86.31.50 Fax 04 72 43 13 88 E2m2∂biomserv.univ-lyon1.fr
EDIIS	**INFORMATIQUE ET INFORMATION POUR LA SOCIETE** http://www.insa-lyon.fr/ediis M. Lionel BRUNIE	M. Lionel BRUNIE INSA DE LYON EDIIS Bâtiment Blaise Pascal 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43.60.55 Fax 04 72 43 60 71 ediis@insa-lyon.fr
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE** http://www.ibcp.fr/ediss M. Alain Jean COZZONE Insa : M. LAGARDE	**M. Alain Jean COZZONE** **IBCP (UCBL1)** 7 passage du Vercors 69367 LYON Cedex 07 Tél : 04.72.72.26.75 Fax : 04 72 72 26 01 cozzone@ibcp.fr
	MATERIAUX DE LYON http://www.ec-lyon.fr/sites/edml M. Jacques JOSEPH Insa : J. M. PELLETIER	M. Jacques JOSEPH Ecole Centrale de Lyon Bât F7 Lab. Sciences et Techniques des Matériaux et des Surfaces 36 Avenue Guy de Collongue BP 163 69131 ECULLY Cedex Tél : 04.72.18.62.51 Fax 04 72 18 60 90 Jacques.Joseph@ec-lyon.fr
Math IF	**MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE FONDAMENTALE** http://www.ens-lyon.fr/MathIS M. Franck WAGNER Insa : G. BAYADA	M. Franck WAGNER Université Claude Bernard Lyon1 Institut Girard Desargues UMR 5028 MATHEMATIQUES Bâtiment Doyen Jean Braconnier Bureau 101 Bis, 1er étage 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43.27.86 Fax : 04 72 43 16 87 Franck.wagner@univ-lyon1.fr
MEGA	**MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE** http://www.lmfa.ec-lyon.fr/autres/MEGA/index.html M. François SIDOROFF Insa : G. DALMAZ	M. François SIDOROFF Ecole Centrale de Lyon Lab. Tribologie et Dynamique des Systêmes Bât G8 36 avenue Guy de Collongue BP 163 69131 ECULLY Cedex Tél :04.72.18.62.14 Fax : 04 72 18 65 37 Francois.Sidoroff@ec-lyon.fr
SSED	**SCIENCES DES SOCIETES, DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DROIT** Mme Claude-Isabelle BRELOT Insa : J.Y. TOUSSAINT	Mme Claude-Isabelle BRELOT Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.69.72.76 Fax : 04.37.28.04.48 Claude-isabelle.brelot@univ-lyon2.fr

Avant-propos

Notre Travail s'est déroulé au sein du Laboratoire des Sciences de l'Habitat, du Département Génie Civil et Bâtiment, unité de recherche associée au CNRS (D 1652), situé dans l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat à Vaulx-en-Velin.

Je tiens particulièrement à remercier…

Gérard Guarracino, directeur du Département Génie Civil et Bâtiment, grâce à qui ce travail s'est pu être réalisé ;

Pierre Michel, mon directeur de thèse, pour son encadrement et son soutien actif tout au long de mes recherches, ainsi que le réel enthousiasme qu'il a su faire partager autour de cette problématique, en y apportant une réflexion scientifique rigoureuse ;

Mathéos Santamouris, professeur à l'Université d'Athènes et Adel Mourtada, professeur à l'Université Libanaise, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de prendre part à ce jury.

Jean Jacques Roux, professeur à l'INSA de Lyon, Didier Mayer, professeur à l'Ecole de Mines de Paris et Samira Kherrouf, ingénieur à l'ADEME, pour avoir accepté de prendre part à ce jury.

Mohamed el Mankibi, enseignant chercheur à l'ENTPE, pour ses conseils et son aide précieuse dans la partie expérimentale de notre recherche.

Tous les membres du laboratoire, particulièrement Bassam Moujalled, avec lesquels j'ai eu la chance de travailler dans une ambiance réellement motivante et sympathique ;

Et plus que tout merci à René, Claude, Chantal, Tarek et Ziad, sans qui tout cela n'aurait aucun sens.

Résumé

L'intérêt grandissant dans l'énergie solaire réside dans le fait qu'elle est une source inépuisable d'approvisionnement en énergie et son usage ne produit ni émission de polluants, ni déchets. Pendant les trente dernières années, les équipements solaires thermiques ont gagné en qualité et en durabilité, mais leur utilisation dans le bâtiment demeure freinée considérablement par une contrainte majeure: « leur intégration dans l'architecture du bâtiment ».

L'objectif de notre étude est double : d'une part conduire une analyse prospective destinée à identifier des pistes d'innovation dans l'intégration architecturale des systèmes solaires thermiques actifs, et d'autre part développer un outil numérique qui permet de calculer la performance énergétique des équipements solaires intégrés et l'impact de l'intégration sur l'ambiance intérieure du bâtiment. Dans un premier temps, une analyse de la problématique de l'intégration architecturale des composants solaires thermiques actifs dans le bâtiment à travers des exemples réalisés nous conduit à définir des principes d'intégration. Dans un second temps, nous développons un outil d'analyse prospective, baptisé SISBat, capable d'évaluer la qualité d'intégration des composants solaires dans le bâtiment et de proposer des perspectives d'évolution. Ensuite, nous développons un environnement de simulation de systèmes solaires intégrés dans le bâtiment. Bien que le système solaire soit considéré dans son ensemble, le travail de développement s'est plutôt focalisé sur le capteur intégré prenant en compte l'interaction capteur/bâtiment. Une fois qu'une proposition d'intégration solaire est développée avec SISBat, son comportement thermique et sa performance énergétique sont étudiés avec le modèle numérique développé afin de vérifier l'intérêt de la solution d'intégration. Enfin, une expérimentation à l'échelle réelle d'un système solaire de production d'eau chaude ayant des capteurs intégrés dans la façade d'un bâtiment expérimental permet non seulement d'étudier le comportement réel de capteurs solaires intégrés, mais aussi de pouvoir confronter les résultats des simulations numériques et les mesures expérimentales et évaluer la capacité du modèle numérique développé à décrire le comportement thermique de tels composants.

Mots clés: Solaire thermique – Intégration architecturale – Procédés constructifs – Prospective – Modélisation – Expérimentation.

Abstract

Nowadays, solar energy shows a growing interest as it presents a clean renewable source of energy, besides it is pollution free during use. During the past thirty years, thermal solar equipments have been subject to many enhancements, but their use in buildings is still restrained by a major constraint: “their integration in the building architecture”.

This thesis presents two main objectives: on the one hand to conduct a prospective analysis in order to identify possible innovative ways for the architectural integration of active thermal solar systems, on the other hand to develop a numerical tool that enables the calculation of the energy performance of integrated solar equipments and its impact on the indoor environment of buildings. At the first time, we have defined the principles of integration through the analysis of the problems that face the architectural integration of active thermal solar components in building based on real cases. Secondly, we have developed a prospective analysis tool named SISBat. This tool can evaluate the quality of the integration of solar components in buildings, and suggest possible ways of enhancement. Afterwards, we have developed a simulation model dedicated to the study of integrated solar systems in buildings. We consider the solar system in its integrity, but we focus mainly on the integrated collector and the interactions that could have with the building. Hence, using SISBat and the developed simulation tool, multiple solutions of solar integration can be emerged and evaluated to show their utility. SISBat determines the potential solutions of integration, and the numerical tool evaluates the thermal behaviour and energy performance of each. At the last stage, we have carried an experimental study on a DHW solar system with four solar collectors integrated to the facades of an experimental building. This experiment enables us to study the behaviour of integrated solar collectors in real conditions, and compare it with the results of the numerical simulations in order to evaluate the numerical model that was developed.

Keywords: Thermal solar – Architectural integration – Construction methods – Foresight – Modelling – Experiment.

Table des matières

Introduction générale

Introduction générale

Depuis les années 80 et les répercussions des chocs pétroliers, l'humanité s'est rendu compte que les ressources d'énergie fossile sont limitées et qu'une mauvaise gestion de l'environnement peut provoquer de changements climatiques de grande envergure et causer des crises graves dans le futur. Selon les accords de Kyoto, à l'horizon 2012, les pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions des six principaux gaz à effet de serre de 5,2 % en moyenne entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990. En signant ce Protocole et ses engagements, la France s'est engagée dans une forte relance de sa politique de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables. De cet engagement s'ensuit, en 2000, l'établissement d'un Plan National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC), remplacé en 2004 par le Plan Climat dans lequel la France a inscrit l'application du « facteur 4 » qui vise à diviser par quatre d'ici 2050 les émissions des gaz à effet de serre.

Le secteur du bâtiment est en France le plus gros consommateur d'énergie avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole (TEP) soit 43 % du total national. La consommation moyenne annuelle d'énergie dans ce secteur est aujourd'hui proche de 400 kWh d'énergie primaire par m² chauffé. Cette énergie consommée entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO2 représentant 25 % des émissions nationales et 32,7 millions de tonnes de carbone [DGEMP, 2006]. La réduction d'un facteur 4 des émissions de CO_2 correspondrait à une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m^2 en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service, dont environ 50 kWh/m^2 pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. On mesure ainsi l'ampleur des efforts technologiques et financiers à réaliser.

Dans ce contexte, l'utilisation thermique de l'énergie solaire dans le secteur du bâtiment constitue un véritable enjeu pour les problèmes environnementaux, économiques et sociaux. L'énergie solaire produit peu de déchets et engendre peu d'émissions de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement de la planète. Elle présente aussi de nombreux avantages au regard de la sécurité énergétique puisqu'elle est une source locale inépuisable.

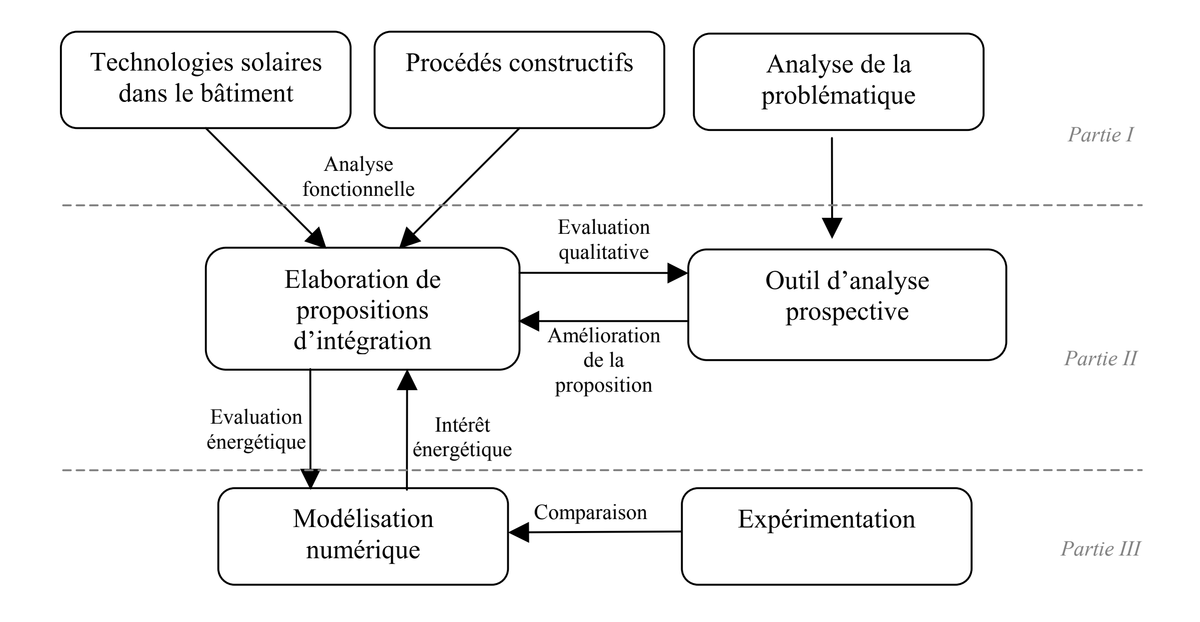
En France, la filière solaire thermique a déjà une grande ancienneté. Depuis trente ans, la qualité des installations solaires thermiques est en constante progression grâce notamment aux efforts faits par les industriels pour améliorer les performances des matériels qu'ils produisent et la mise en place de procédures de qualification et de certification des produits. L'augmentation du prix de pétrole, la volonté nationale de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et la mise en place depuis janvier 2005 d'un crédit d'impôt de 40% venant en remboursement ou en déduction de l'achat du système solaire thermique, ont permis de donner un coup d'accélérateur réel au développement de cette filière. Mais le marché des équipements solaires thermiques restait jusqu'à récemment encore relativement modeste et leur diffusion se trouve freinée par quatre contraintes majeures et fortement liées :

- la qualité de leur intégration technique et architecturale aux bâtiments et à leur environnement ;
- le coût des installations et de leur mise en œuvre ;
- la perception de l'esthétique de ces systèmes au sein des bâtiments ;
- la distribution et la diffusion assurées par des circuits spécifiques distincts des circuits traditionnels du bâtiment.

Ainsi, l'intégration des composants solaires actifs dans le bâtiment apparaît comme un élément clé qui permet d'éviter des solutions d'implantation parfois inesthétiques, et des surcoûts de réalisation trop importants. En outre, des solutions inadaptées pourraient conduire à dévaloriser les bâtiments ou à en menacer l'intégrité.

Notre recherche consiste à conduire une réflexion prospective destinée à identifier des pistes d'innovation dans l'intégration technique et architecturale des systèmes solaires thermiques actifs. L'objectif est d'analyser des possibilités d'intégration des équipements solaires thermiques actifs dans les constructions neuves et les bâtiments existants, et d'explorer les différentes possibilités d'évolutions technologiques qui mèneront à la proposition des pistes de recherche détaillée et d'application des innovations technologiques envisageables dans le domaine des matériaux et des procédés de fabrication. Les améliorations et les innovations de systèmes sont censées réduire le coût de la réalisation et de fonctionnement du système solaire ou augmenter le rendement des systèmes et favoriser ainsi la croissance de marché du solaire.

Dans le but d'atteindre nos objectifs, nous proposons une démarche articulée autour de plusieurs principes méthodologiques. Elle peut être représentée graphiquement de la manière suivante :



Dans un premier temps, nous effectuons l'analyse de la situation actuelle de la technologie solaire thermique dans le secteur bâtiment. Cette analyse nous permet de mettre en évidence les principales applications des systèmes solaires thermiques dans ce secteur, et de faire une analyse des ressources et des besoins à satisfaire. Cette étape constitue le premier apport pour la définition des composants devant assurer les fonctions essentielles de l'enveloppe considérée comme système solaire, notamment les fonctions de captage, de stockage et de distribution.

Elle est suivie par un état de l'art des procédés constructifs dans le domaine de bâtiment. Une typologie de différentes techniques de construction est présentée afin de repérer les éléments et les phases du processus de construction qui peuvent servir à intégrer des composants solaires. Cette étape constitue un second apport pour la définition des composants et des techniques constructives qui permettent d'intégrer les fonctions de transfert propres aux systèmes solaires.

Une analyse fonctionnelle des systèmes solaires et des éléments de construction conduit à définir et établir une série de propositions d'intégration. L'analyse détaillée de toutes les propositions se révélant difficile à effectuer dans le cadre de notre recherche, un classement de ces propositions suivant des critères de faisabilité nous conduit à en retenir certaines pour être analysées et développées à travers un outil d'analyse prospective. L'analyse de la problématique de l'intégration technico-architecturale des systèmes solaires dans la structure bâtie nous permet d'établir un cadre rigoureux pour le développement de cet outil.

Dans la deuxième partie, un outil d'analyse prospective capable d'évaluer la qualité d'intégration des composants solaires dans le bâtiment est développé suivant une approche systémique. Nous élaborons une structure méthodologique qui puisse répondre à cet objectif en utilisant l'analyse structurelle. D'abord un recensement des différentes variables qui peuvent intervenir sur la qualité d'intégration est fait suivant des critères architecturaux, économiques, techniques, environnementaux et réglementaires. Ceci est traduit à travers une grille d'analyse du cycle de vie de l'élément solaire, permettant aussi de hiérarchiser les variables. Ensuite nous effectuons une identification des différentes influences directes que peuvent avoir les différentes variables les une sur les autres. L'utilisation de la méthode Micmac met en évidence l'influence indirecte entre les différentes variables. Ensuite, une méthode de pondération suivant la motricité des variables est élaborée, afin de pouvoir attribuer une note d'évaluation de l'intégration solaire. Une application de l'outil aux propositions d'intégration préalablement formulées permet d'analyser la qualité d'intégration architecturale et met en évidence les principaux facteurs d'évolution de ces solutions. Ainsi cette méthode nous permet, non seulement de mettre en évidence les points faibles de chaque solution d'intégration, mais aussi de pouvoir optimiser la proposition en tenant compte des influences que peut avoir l'amélioration de ces points sur le système tout entier.

Ensuite, la méthode d'évaluation qualitative est complétée par une modélisation physique des capteurs solaires plans intégrés dans l'enveloppe du bâtiment. Les principes physiques mis en jeu sont détaillés et précisés afin de cerner le rôle des différents paramètres et caractéristiques physiques dans le fonctionnement et l'optimisation du système solaire, notamment les phénomènes énergétiques (transfert de chaleur et de masse, échange de chaleur entre surfaces). Un modèle global du système solaire prenant en compte l'interaction capteur/ bâtiment permet de quantifier la performance de différentes solutions, sur les plans énergétique et environnemental. L'analyse des résultats nous permet d'évaluer le comportement thermique des composants constitutifs de l'enveloppe et de cerner l'impact de l'intégration des composants solaires dans l'enveloppe du bâtiment sur la qualité d'ambiance et sur le confort dans le bâtiment.

Enfin, dans le cadre d'un projet de recherche et développement sur l'intégration solaire, mené par une équipe de six partenaires dont nous faisons partie, et soutenu par l'ADEME, des prototypes de capteurs solaires intégrés dans les façades vitrées sont fabriqués et installés sur la façade expérimentale du bâtiment des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau. La mise en place de l'expérimentation à l'échelle réelle pendant le second semestre de 2005 permet non seulement de concrétiser une des propositions d'intégration évaluées par la méthode prospective développée, mais permet aussi d'étudier le comportement réel et la productivité énergétique de tels composants. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulations numériques permet d'évaluer la capacité du modèle numérique développé à décrire le comportement thermique de tels composants.

Partie I
Énergie solaire thermique dans le bâtiment
État des lieux

Chapitre 1 :
Problématique d'intégration des composants solaires

1 Problématique d'intégration des composants solaires

1.1 Analyse du contexte

En quelques décennies, la technologie et les ressources du sous-sol ont bouleversé les standards de confort et transcendé les exigences. Le niveau de vie a atteint un degré d'excellence sans précédent. Cependant, contrainte par l'épuisement des réserves, l'augmentation des coûts et de gravissimes atteintes à la biosphère, la tendance s'inverse rapidement.

Le rapport du Club de Rome de 1972 s'intitulant « Les limites de la croissance » et la première crise pétrolière de 1973 ont attiré l'attention de l'humanité sur le fait que les ressources d'énergie fossile sont limitées et qu'une mauvaise gestion de l'environnement peut provoquer de changements climatiques de grande envergure et causer des crises graves dans le futur [PEUSER, 2005]. Par conséquent, les deux dernières décennies ont annoncé une prise de conscience internationale progressive traduite par une succession de sommets environnementaux.

1.1.1 La lutte contre le changement climatique

À partir des années 80, le phénomène des changements climatiques (effet de serre), fortement médiatisé, a fait l'objet de nombreuses polémiques. Cette problématique fait maintenant l'unanimité sur la scène scientifique internationale. Le dernier rapport du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) a confirmé le relèvement de la température moyenne de l'atmosphère terrestre de 1° à 6 °C d'ici à la fin du siècle. Ce réchauffement a déjà provoqué des perturbations climatiques ayant des répercussions gravissimes. Celles-ci risquent d'être de plus en plus importantes dans l'avenir.

Selon les accords de Kyoto, à l'horizon 2012, les pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions des six principaux gaz à effet de serre de 5,2 % en moyenne entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990. Les pays en voie de développement ont été exemptés d'engagements chiffrés afin que leur croissance ne soit pas remise en cause. L'entrée en vigueur de ces mesures, le 15 février 2005, révèle implicitement la limite des ambitions. Déjà les pays d'Europe organisent le rachat de droits pollueurs pour compenser leurs déficiences environnementales, et les États-Unis rejettent les limites préconisées par l'ONU. La filière électronucléaire, quant à elle, avance ses faibles émissions de gaz à effet de serre et sa productivité, n'hésitant pas à dissimuler son potentiel mutagène derrière un label « énergie propre » troublant. À l'inverse, les énergies renouvelables produisent peu de déchets et engendrent peu d'émissions polluantes, en particulier les gaz à effet de serre, responsables du réchauffement de la planète et du dérèglement climatique.

1.1.2 L'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement

Parfois estompé lorsque la conjoncture paraît orientée à la baisse des prix et à l'abondance des disponibilités, l'enjeu d'indépendance énergétique et de sécurité d'approvisionnement revient au galop à la première alerte économique ou géopolitique. Il n'y a préoccupation pour la sécurité que lorsqu'il y a risque sur les approvisionnements. Mais quels sont ces risques ?

- Le premier risque est celui d'une rupture physique d'approvisionnement à long terme. La rupture ou le rationnement physique peuvent tout simplement résulter de l'épuisement des ressources ou de l'insuffisance des moyens de production. S'agissant des énergies fossiles, la mesure de la durée de vie des réserves révèle bien cette préoccupation qui pourra un jour devenir une véritable hantise [Figure 1-1].

Figure 1-1 : Estimation des réserves mondiales [LHOMME, 2005].

- Le deuxième risque est celui de la rupture sur les prix. Les divers chocs pétroliers depuis 1973 illustrent abondamment cette menace. En effet, le renchérissement brutal, ou non, durable ou non, récurent ou non, est un facteur de déstabilisation profonde des marchés. Ce risque est réel puisqu'il s'est concrétisé à plusieurs reprises, principalement sur le pétrole.
- Le troisième risque est géopolitique. Certains pays n'hésitent pas à brandir ouvertement l'arme du pétrole.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages au regard de la sécurité énergétique. En premier lieu, elles ne posent pas, contrairement aux ressources fossiles, et dans une moindre mesure aux ressources fissiles, de risque d'épuisement. Certaines, comme l'énergie solaire, apparaissent vraiment comme disponibles en quantité illimitée.

1.1.3 Le contexte énergétique Français

La France s'était ainsi attachée, avant même le protocole de Kyoto, à réduire ses émissions de gaz à effet de serre, par des mesures qui se limitaient à l'horizon 2010. En signant ce Protocole et ses engagements, la France s'est ensuite engagée dans une forte relance de sa politique de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables. De cet engagement s'ensuit, en 2000, l'établissement d'un Plan National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC), remplacé en 2004 par le Plan Climat. Dans ce dernier et dans la loi d'orientation sur l'énergie de juillet 2005, la France a inscrit l'application du « facteur 4 » qui vise à diviser par quatre d'ici 2050 les émissions des gaz à effet de serre. Ces intentions sont d'autant plus justifiées que figurent parmi les objectifs de la politique énergétique nationale : la montée en puissance des biocarburants ; une augmentation de 15 % à 21 % de la part de la consommation nationale d'électricité d'origine renouvelable ; ainsi qu'une augmentation de 50 % de la production de chaleur d'origine renouvelable en 2015. Ce dernier objectif révèle l'intérêt grandissant des systèmes solaires thermiques.

1.1.4 Quelle place pour l'énergie solaire thermique?

Ces problèmes concourent à aviser nos sociétés de la nécessité d'une modification radicale du mode de production de l'énergie. Néanmoins, afin d'être efficace, cette réorganisation de la production énergétique se doit d'être menée de front avec les problèmes sociaux de ce siècle : chômage, travail précaire, inégalités nord-sud… C'est pourquoi des solutions écologiquement intéressantes, telles que les énergies renouvelables, ne peuvent se limiter à une vulgaire substitution du nucléaire et du pétrole. Il est en effet essentiel qu'elles s'intègrent dans une démarche globale, qui participe à une alternative sociale autant qu'écologique.

On appelle énergies renouvelables, les énergies issues de sources non fossiles renouvelables : énergies solaire, éolienne, géothermique, marémotrice, hydroélectrique, bioénergies… Ces énergies sont présentes partout. Elles sont inépuisables grâce aux cycles naturels, mais sont également diffuses et présentent pour la plupart des potentiels variables selon la localisation géographique et les facteurs climatiques. Par ailleurs, elles n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement : leur exploitation n'engendre en effet pas d'émissions de gaz à effet de serre ; si bien qu'elles s'avèrent être un outil considérable de lutte contre le changement climatique.

Les usages thermiques à basse température, qui représentent en France le tiers de consommations d'énergie finale, sont ceux qui peuvent être le plus facilement satisfaits par l'utilisation des énergies renouvelables et qui sont directement à portée de décision du citoyen. On redécouvre à cette occasion tout l'intérêt des systèmes solaires thermiques. Le flux solaire peut en effet être directement converti en chaleur, au moyen de capteurs solaires thermiques actifs. Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à

la production d'eau chaude sanitaire (ECS), ou encore au séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits). L'énergie solaire thermique présente deux avantages fondamentaux : elle est une source inépuisable d'approvisionnement en énergie et son usage ne produit ni émission de polluants, ni déchets.

Il faut également souligner que cette énergie est surtout une ressource locale, qui ne présente donc pas de problème d'approvisionnement en énergie. Cette disponibilité locale peut rendre son utilisation très décentralisée, ce qui peut présenter des avantages pour l'indépendance énergétique, la diversification des sources, pour l'économie des devises, pour la création d'emplois dans des métiers nobles, porteurs de plus-values sociales, sans oublier l'enjeu industriel ainsi que le rayonnement certain qu'elle évoque. Cet atout est cependant parfois compensé par le fait que leur disponibilité n'est pas constante, et peut dépendre des aléas climatiques, ce qui impose la disponibilité simultanée d'autres ressources.

1.2 Développement du marché des systèmes solaires thermiques

Depuis plus de 30 ans, les installations solaires thermiques apportent une contribution importante à la protection du climat et à la stabilité de l'alimentation en énergie. Les systèmes des débuts sont devenus, au cours des 30 dernières années, des installations de niveau professionnel, fabriquées à l'échelle industrielle. Dans de nombreux pays d'Europe, en Asie et autour de la Méditerranée, on assiste à une forte croissance du marché des installations solaires thermiques. Afin de permettre la comparaison du solaire thermique avec d'autres filières énergétiques, un nouvel indicateur présentant l'équivalent de la surface solaire thermique installée en puissance thermique, 0,7 kWth par m² installé, est parfois utilisé. Ce facteur de conversion est agréé par l'IEA-SHC (International Energy Agency – Solar Heating and Cooling Programme) et par les associations de promotion du solaire [EurOber'ER, 2005].

1.2.1 Développement du marché solaire thermique mondial

Durant 2004, la surface totale des capteurs solaires installés dans le monde a été environ 12 à 13 millions de m². La Chine, où un grand nombre de fabricants locaux produisent des capteurs plans et des capteurs à tube sous vide, détient à elle seule 78% du marché mondial [Figure 1-2]. Il apparaît tout aussi nettement que, à l'exception de l'Europe, la Turquie et Israël, le marché des systèmes thermiques solaires dans le reste du monde est aujourd'hui presque négligeable.

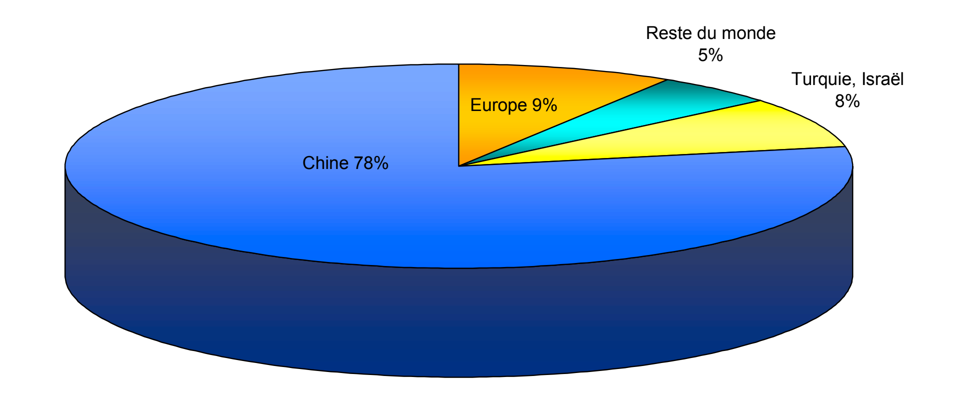


Figure 1-2 : Surfaces de capteurs installées dans le monde en 2004 [ESTIF, 2005].

1.2.2 Développement du marché solaire thermique européen

Le développement de l'énergie solaire thermique en Europe a connu deux périodes importantes aux cours des 30 dernières années. La première phase de croissance du secteur est survenue au lendemain du choc pétrolier de 1973. Cette croissance a connu un coup d'arrêt brutal à la suite du contre-choc pétrolier de 1985. Le prix du pétrole revenant dans des fourchettes plus raisonnables, de nombreux pays comme la France, l'Italie ou l'Espagne se sont détournés de cette filière. C'est après un période d'environ une dizaine d'années que le solaire thermique a connu un renouveau porté essentiellement par la montée des considérations environnementalistes. Ainsi, depuis 1995, les surfaces installées annuellement au sein des pays européens n'ont cessé de progresser en passant de 640 000 m² à 1 693 004 m² en 2004 [Figure 1-3].

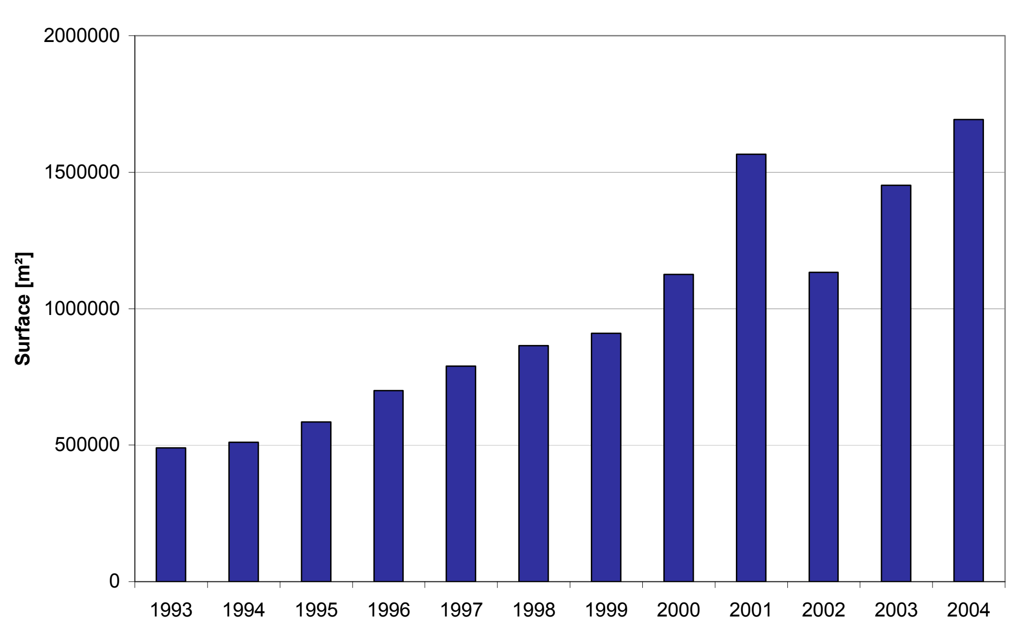


Figure 1-3 : Evolution des surfaces installées annuellement dans l'UE [EurObserv'ER, 2005].

L'Allemagne, l'Autriche et la Grèce sont les plus importants marchés du solaire thermique au niveau européen. L'Allemagne a ainsi enregistré un chiffre d'affaires de 550 millions d'euros pour l'année 2004 dans le domaine du solaire thermique. La surface totale des capteurs

solaires nouvellement installés s'élevait à 750 000 m², ce qui équivaut une puissance solaire thermique de 525 MWth. Selon l'ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation), les trois marchés leaders ne se sont certes développés que lentement ces dernières années, mais ils sont en train de fournir un effort considérable en vue de renforcer la dynamique du marché. A la fin de l'année 2001, la puissance thermique des capteurs solaires installés atteignait sur ces marchés 69 000 MWth. Quant aux marchés espagnol, français et italien, ils traversent actuellement une phase de développement très dynamique dans l'optique de rattraper l'avance considérable prise par les pays leaders. L'Espagne a de plus promulgué un décret rendant obligatoire l'installation de systèmes solaires thermiques sur les bâtiments neufs et en rénovation.

1.2.3 Développement du marché solaire thermique français

En France, la filière solaire thermique est en constante progression. Les chiffres de marché annuel sont en effet passés de 20 000 m² en 1999 à 121 500 m² en 2005 [Figure 1-4].

L'origine de cette relance est due essentiellement au « Plan Soleil », qui est un programme de promotion dirigé par l'Agence de l'Environnement de la Maîtrise d'Énergie (ADEME) sur la période 2000-2006. Actuellement le « Plan Soleil » cède sa place au plan « Face Sud » inscrit dans la loi d'orientation sur l'énergie et qui vise à installer 200 000 Chauffe-eau solaires par an et 50 000 toits solaires thermiques-photovoltaïques par an à l'horizon 2010, soit environ un million de m² annuels à installer.

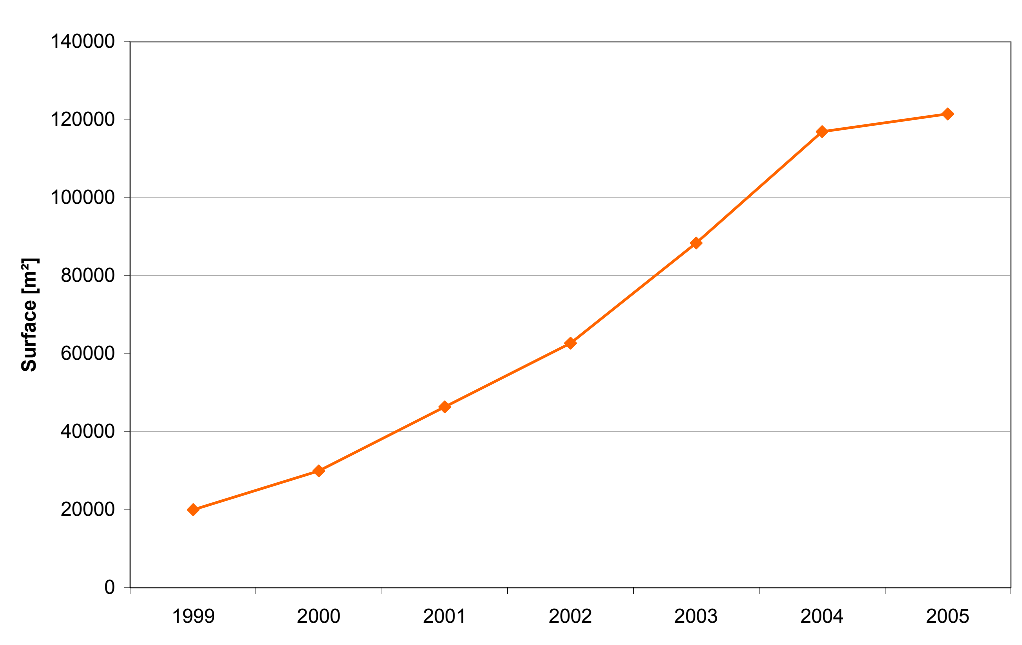


Figure 1-4 : Evolution des surfaces installées annuellement en France [Enerplan, 2006]

La croissance du parc solaire thermique ces trois dernières années est aussi due au développement d'une filière industrielle qui s'est largement professionnalisée. Elle a permis à une trentaine de nouveaux opérateurs industriels, constructeurs ou importateurs distributeurs, de rentrer sur le marché au côté de Giordano Industries et Clipsol, les deux fabricants français

acteurs de la filière depuis plus de 20 ans. En plus, Électricité de France, Gaz de France et Primagaz intègrent désormais les chauffe-eau et les chauffages solaires dans leurs offres commerciales.
En ce qui concerne les aides financiers, il faut noter que, depuis 2005, l'installation d'un système solaire thermique est nettement plus encouragée par l'octroi d'une bonification fiscale s'élevant à 40 % des coûts d'investissement.

Cependant, malgré toutes les connaissances et techniques aujourd'hui avérées, le développement du marché français semble en effet se heurter à des obstacles de différents ordres :

- Obstacles politiques : Si certaines politiques encouragent l'utilisation de l'énergie solaire au moyen d'incitations diverses (déductions fiscales, aides à l'investissement, etc.), il est essentiel, pour des questions d'efficacité, que ces politiques s'inscrivent dans la durée, ce qui est rarement le cas.
- Obstacles économiques : La gratuité des ressources est contrebalancée par le coût élevé des installations. En effet, comparés aux prix bas relatifs des énergies fossiles, les coûts d'investissement des matériels solaires apparaissent souvent excessifs, sauf si l'accès aux énergies conventionnelles est lui-même coûteux (à l'instar d'une extension du réseau électrique en zone peu dense).
- Obstacles socioculturels : L'installation d'un système solaire demande non seulement une adaptation, mais encore une acceptation du consommateur. Celui-ci se doit en effet d'adapter son comportement de consommateur à l'énergie, en terme notamment de disponibilité des sources : les variations périodiques (jours, saisons) et aléatoires (nuages) de l'ensoleillement, ajoutées à la difficulté de stockage de la chaleur au-delà de quelques heures engendrent une variation de l'offre à laquelle est assujetti le consommateur. Par ailleurs, il est nécessaire que le consommateur accepte l'installation. Celle-ci se doit donc d'être de manière évidente : opérationnelle, mais également de présenter une maintenance aisée et d'être intégrée à son environnement, tant technique que naturel, urbain ou architectural.

1.3 Le poids considérable du secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est en France le plus gros consommateur d'énergie avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole (TEP) soit 43 % du total national. La Figure 1-5 montre l'évolution de la consommation d'énergie finale par secteur en France de 1973 à 2004. Sur les différentes années, le secteur des bâtiments devance toujours les autres secteurs.

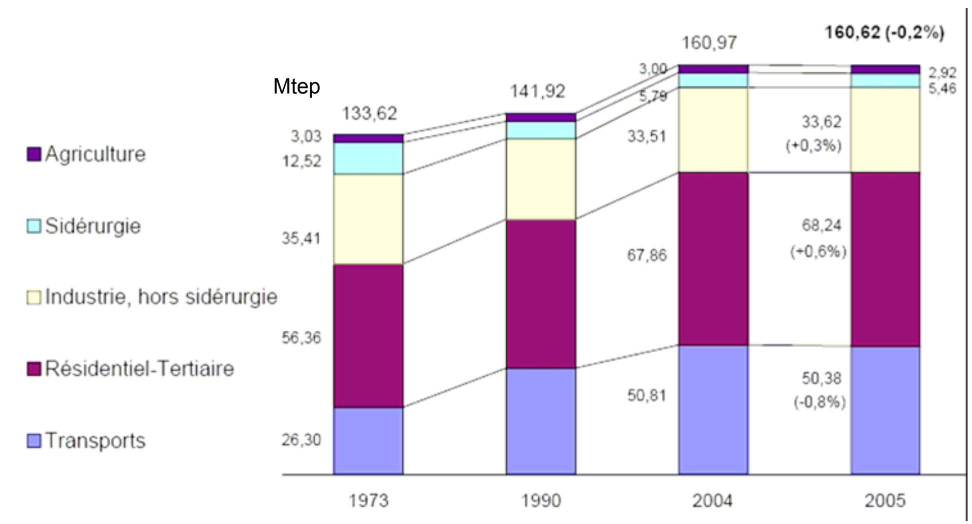


Figure 1-5 : Evolution de la consommation énergétique finale par secteur en France [DGEMP, 2006]

Malgré les gains importants obtenus sur les logements neufs grâce aux réglementations thermiques successives, la consommation d'énergie totale des bâtiments a augmenté de 30 % au cours des trente dernières années. Parmi les raisons : l'accroissement du parc de bâtiments, l'augmentation de la surface moyenne des logements, l'élévation du niveau de confort et tout particulièrement la forte croissance des consommations d'électricité liées aux appareils électroménagers, audiovisuels et informatiques renouvellement et traitement d'air et surtout la climatisation. En outre, la durée de vie des bâtiments est en moyenne très longue et le rythme de renouvellement du parc est très faible. On estime que 60 à 70 % des bâtiments de 2050 sont déjà construits.

Les principales formes d'usage de l'énergie dans les bâtiments sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la cuisson et l'électricité spécifique (éclairage, électroménager,…) [Figure 1-6].

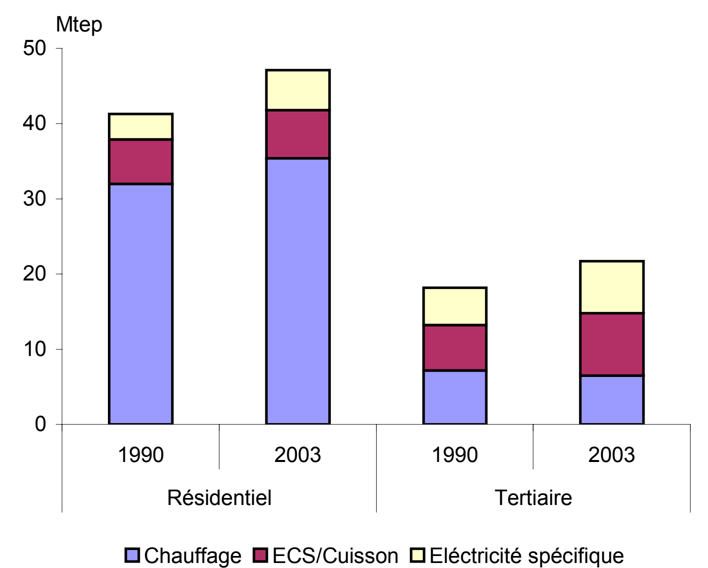


Figure 1-6 : La consommation d'énergie par usage en France [DGEMP, 2006]

Dans le résidentiel, c'est le chauffage qui consomme le plus d'énergie avec plus de 75 %, suivi par l'eau chaude sanitaire et la cuisson, et les usages spécifiques de l'électricité. Pour le

tertiaire, la situation est différente. La consommation est presque la moitié de celle du résidentiel, mais elle est répartie quasi-également entre les différents usages. Par contre, de trois formes d'usage, c'est l'électricité à usage spécifique qui marque l'évolution la plus importante dans le résidentiel et le tertiaire, + 56 % dans le résidentiel et + 38 % dans le tertiaire pour l'année 2003 par rapport à 1990.

En général, la consommation moyenne annuelle d'énergie dans ce secteur est aujourd'hui proche de 400 kWh d'énergie primaire par m² chauffé. Cette énergie consommée entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO_2 représentant 25 % des émissions nationales et 32,7 millions de tonnes de carbone [Figure 1-7]. Cette quantité est du même ordre de grandeur que celle des déchets de chantiers de bâtiments ou des déchets des ménages. C'est aussi une demi-tonne de carbone émise dans l'atmosphère chaque année par chacun d'entre nous. La réduction d'un facteur 4 des émissions de CO_2 correspondrait à une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m^2 en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service, dont environ 50 kWh/m^2 pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. On mesure ainsi l'ampleur des efforts technologiques et financiers à réaliser.

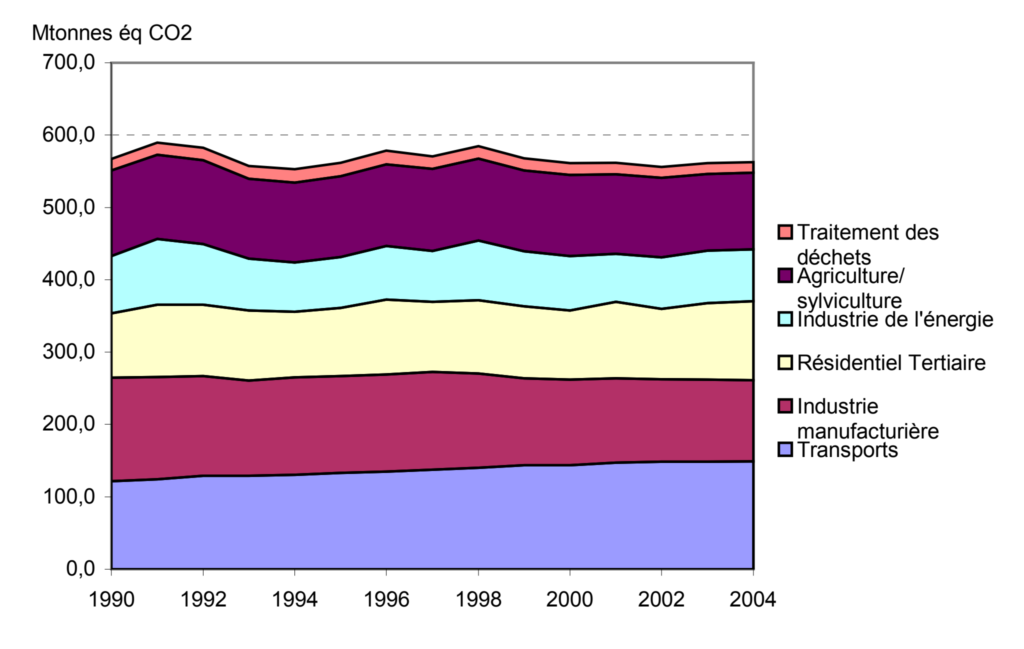


Figure 1-7 : Emission de CO_2 par secteur en France [DGEMP, 2006].

Ainsi, le secteur du bâtiment voit apparaître de nouvelles exigences pour tenter de diminuer son impact environnemental. Notamment, l'évaluation de la qualité environnementale du bâtiment est une démarche de plus en plus suivie par les maîtres d'ouvrage. À ce titre, un projet de certification HQE (Haute Qualité Environnementale) des bâtiments tertiaires est développé et soutenu par l'ADEME et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). La démarche HQE correspond à la mise en œuvre du développement durable dans le secteur du bâtiment français. Le développement durable suppose la prise en compte des facteurs environnementaux, économiques et sociaux ; l'ensemble est organisé selon les

principes de la gouvernance [Hetzel, 2003]. Ainsi, la HQE est définie comme une démarche de management de projet visant à limiter les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement extérieur tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saine et confortable.

A ce stade, Il nous paraît important pour la suite de noter que dans le cycle de vie de bâtiment, les impacts environnementaux engendrés pendant la phase d'utilisation de celui-ci sont prépondérants par rapport aux impacts engendrés pendant les autres phases : la fabrication des matériaux et composants, la construction, la rénovation et l'entretien, la démolition, et le traitement en fin de vie des déchets.

Si l'objectif est accessible pour les bâtiments neufs grâce au développement de nouvelles technologies, il sera beaucoup plus difficile à atteindre dans les bâtiments existants. Or, sur ces bâtiments, des gisements d'économies d'énergie ou de substitution par les énergies renouvelables sont importants. Une réhabilitation de la totalité du parc ancien pourrait entraîner une réduction des consommations de plus de 50 TWh en 2010 et de 120 TWh en 2050. Plus de 3,5 millions de chaudières de chauffage central individuel ont plus de 15 ans. Leur remplacement par des appareils neufs permettrait des gains significatifs tout comme la diffusion des technologies existantes les plus performantes en termes de froid, de lavage et d'éclairage.

Ce contexte énergétique du bâtiment a amené un pays comme la France, par l'intermédiaire notamment de l'ADEME à développer l'intégration des énergies renouvelables dans le bâtiment, notamment par le biais de composants solaires. Ces technologies sont en effet bien placées par rapport aux autres filières énergétiques vis-à-vis de la plupart des critères de développement durable : ressources renouvelables, réduction des émissions et des déchets générés sur le cycle de vie du bâtiment.

1.4 Problématique liée à l'intégration technico-architecturale

Si la qualité et la durabilité des équipements sont désormais assurées, il demeure un frein considérable à la progression du solaire actif : son intégration dans l'architecture des bâtiments.

En France, l'intégration des capteurs solaires reste encore marginale par rapport au niveau de développement que l'on connaît dans d'autres pays, notamment en Allemagne, en Suisse ou en Autriche.

Suite à ce constat, deux questions importantes se posent:

- Comment expliquer cette réticence des maîtres d'ouvrage et architectes à l'égard des composants thermiques actifs solaires ?
- Quelles pourraient être les conditions de leur intégration architecturale ?

Les conclusions d'une enquête réalisée en 2005 par l'architecte Sonia Cortesse auprès des architectes et des maîtres d'ouvrage mettent en évidence trois points :

- Un manque de choix et surtout de modularité parmi les produits proposés ;
- La nécessité de la prise en compte de la contrainte solaire en amont dans le processus de conception d'un projet ;
- L'importance du coût du composant solaire.

Sur le plan esthétique l'attente des architectes est de disposer de produits plus modulables pour une plus grande liberté d'inventivité. Néanmoins, 10% des interrogés estiment que c'est l'architecte lui-même qui doit trouver des solutions avec ce qui existe déjà. Quelques opérations pilotes, souvent dans les pays germaniques, en attestent [CORTESSE, 2006].

Les principaux facteurs d'intégration peuvent être révélés à travers l'analyse de différents exemples de bâtiments intégrant le solaire thermique, afin de repérer ce qui distingue les intégrations réussies de celles qui le sont moins.

1.4.1 Exemples d'intégration de capteurs solaires dans le bâtiment

L'harmonie architecturale est un élément important de la réussite de l'intégration des éléments solaires dans la construction. Le problème d'intégration du système solaire dans la construction repose surtout sur l'intégration des capteurs dans le bâtiment car ce composant du système est le plus visible et indique aux observateurs que le bâtiment est solarisé.

Étant précédemment considérés comme les éléments indésirables qu'il faut cacher, la tendance actuelle de la réponse au problème d'intégration des capteurs solaires ainsi que d'autres éléments du système solaire tend à les inclure dès la phase de conception des bâtiments. Ces éléments doivent donc être considérés comme des composants du bâtiment au même titre qu'un mur ou une toiture. À ce titre, l'architecte ou le concepteur se doit de l'intégrer dans l'ordonnancement d'une façade, d'une toiture ou d'un volume, en veillant à conserver ses spécificités formelles et fonctionnelles : éléments vitrés de quelques mètres carrés, de couleur noire, orientés au sud dans une zone dégagée de toute ombre.

Lors de l'implantation du système solaire dans la construction, il faut respecter les règles d'installation. Celles-ci sont répertoriées dans des documents réglementaires et des recommandations :

- Réalisation des installations des capteurs solaires plans à circulation de liquide pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (NF P 50-601 – DTU 65.12) ;
- Cahier des charges type applicable à l'installation de chauffe eau solaire individuel (CESI) dans l'habitat neuf ou existant (CSTB) ;
- Cahier des prescriptions techniques communes aux capteurs solaires plans à circulation de liquide faisant l'objet d'un avis technique ;
- Règles générales de mise en œuvre de capteurs solaires indépendants sur une couverture par éléments discontinus (cahier du CSTB).

Si la solution la plus communément retenue a été jusqu'à ce jour la mise en œuvre des capteurs solaires de manière indépendante sur support, en toiture ou sur terrasses, dans toute l'Europe, les fabricants des matériels, les architectes et les maîtres d'ouvrages travaillent à perfectionner l'intégration des capteurs solaires dans les sites.

1.4.1.1 Intégration en toiture

L'intégration en toiture oblige à respecter la pente du toit (même si le toit est horizontal) et n'est donc conseillée que si la toiture a une bonne inclinaison (en France entre 42 et 55°). Cette intégration pose surtout le problème de l'étanchéité de la toiture. Il faut que les instructions du fabricant soient claires et l'installateur compétent. En France, les produits sur le marché ont été testés et bénéficient d'avis techniques émis par le CSTB, donc c'est du savoir-faire de l'entrepreneur que dépend la réussite de l'installation.
Les capteurs implantés sur un toit incliné sont mieux perçus s'ils font une partie intégrée de la toiture [Figure 1-8].

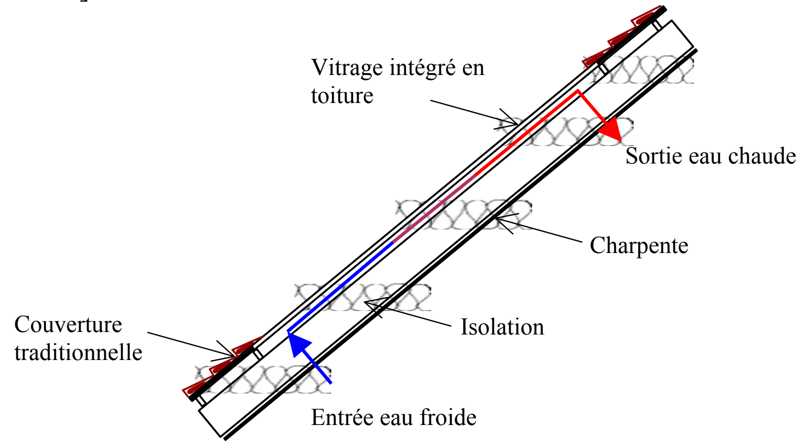


Figure 1-8 : Coupe d'un capteur solaire intégré en toiture inclinée [Clipsol].

Il est évident que le choix du capteur relève non seulement de l'objectif de capacité du dispositif mais aussi de l'esthétique. Les architectes ont souvent reproché aux capteurs à poser de ne pas s'insérer discrètement dans la structure bâtie. Cela ne doit pas pour autant représenter un handicap car il existe de nombreux exemples d'intégration réussie, basée sur une mise en valeur de cette technologie. Ceci peut même conduire à une valeur ajoutée au bâtiment. Nous présentons dans les Figure 1-9 et Figure 1-10 deux exemples d'intégration de capteurs solaires en toiture.



Figure 1-9 : Exemple d'intégration en toiture d'une maison près d'Aix les Bains [Clipsol].



Figure 1-10 : Exemple d'intégration en toiture d'un bâtiment en Finlande [Solpros].

Les solutions de capteurs intégrés en toitures bien que largement diffusées, en particulier dans les pays de l'Europe du Nord, ne permettent pas de répondre à toutes les situations, et posent souvent un problème de dimension [De SOUSA, 2003].

1.4.1.2 Intégration en façade

Un capteur solaire intégré en façade sert non seulement comme capteur, mais également en tant qu'isolation thermique et d'élément formel de la façade [Figure 1-11]. Cet usage multifonctionnel des composants du bâtiment peut avoir comme conséquence une réduction de coûts. Un autre avantage de ces capteurs intégrés consiste en une irradiation solaire répartie d'une façon plutôt stable au cours de toute l'année. Le fait que les capteurs inclinés puissent être couverts de neige en hiver, alors que les capteurs intégrés en façade tirent bénéfice de la réflexion du rayonnement solaire sur la neige, a été en grande partie négligé jusqu'au moment.

Un capteur solaire comme élément de façade n'est pas dans la position de rendement maximum. Mais une étude de l'impact de l'inclinaison sur la performance d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire, en utilisant la méthode SOLO[1], pour une installation orientée plein Sud dans la région lyonnaise, a permis de constater que le passage

[1] La méthode SOLO est l'outil de calcul utilisé dans le cadre de la procédure de « garantie solaire » et est aussi utilisée pour calculer les performances conventionnelles des chauffe-eau solaires dans le cadre de l'avis technique.

d'une inclinaison de 30° à une inclinaison verticale diminue la productivité d'en moyenne 27%, ce qui revient à acheter un capteur supplémentaire [De SOUSA, 2003].
En termes d'espace, cela est tout à fait acceptable, étant donné que la surface disponible en façade est généralement supérieure à celle en toiture. Les bâtiments à façades en verre, sont réfléchissants vus de l'extérieur et légèrement opaques vus de l'intérieur. Il est donc intéressant de réaliser, pour un tel bâtiment, une façade de capteurs qui laisserait passer suffisamment de lumière et fournirait l'énergie nécessaire à l'eau chaude sanitaire, au chauffage et à la climatisation des locaux.



Figure 1-11: Capteurs solaires intégrés en façade [Wagner & Co, Germany].

Les allèges, garde-corps et brise-soleil peuvent aussi offrir des possibilités intéressantes d'intégration en façade [Figure 1-12, Figure 1-13 et Figure 1-14].



Figure 1-12 : Capteurs solaires en allège en Pyrénées-Orientales [AME-LR][2].



Figure 1-13 : Capteurs solaires en garde-corps à Herning, Denmark [Solarnova].

[2] Agence Méditerranéenne de l'Environnement : Région Languedoc-Roussillon




Figure 1-14 : Capteurs solaires en brise-soleil [Outilssolaires].

1.4.1.3 Le capteur comme élément du paysage

Dans certains cas favorables, les capteurs peuvent être posés sur talus et ainsi se cacher de tout, sauf du soleil. Il est alors nécessaire de les protéger des salissures qui pourraient diminuer leur rendement.

Cette solution est intéressante. Elle simplifie la pose et permet d'obtenir l'angle d'inclinaison choisi pour le capteur. Cette solution est envisageable sur un talus de jardin ou sur une terrasse au pied de la maison [Figure 1-15]. Bien évidemment, le fait d'éloigner de cette façon le système en lui-même permet de gommer l'aspect inesthétique de l'installation. Pourtant, cela ne va pas sans créer d'autres contraintes. Il faut alors faire face à une perte de rendement causée par une plus grande distance du transfert énergétique entre le capteur et le stockage, et porter une attention toute particulière aux raccords et à l'isolation, ce qui implique l'absence de recours à cette solution dans les régions au climat trop rigoureux ou trop venteux.



Figure 1-15 : Implantation de capteurs au sol au Centre Héliomarin, Vallauris [Tecsol].

Les capteurs solaires peuvent aussi trouver leur place naturellement comme composants des annexes de l'habitation sous réserve que ces annexes soient proches du bâtiment principal (serres, garages, abris, ...).

1.4.2 La qualité architecturale

D'après l'enquête menée par Sonia Cortesse auprès d'architectes et de maîtres d'ouvrage, il apparaît que la qualité architecturale et la qualité du design du produit sont des facteurs primordiaux de la réussite de l'intégration des éléments solaires dans la construction, alors que le mode d'intégration est relativement secondaire [CORTESSE, 2006]. La conception architecturale est une démarche de synthèse formelle et technique de contraintes extrêmement diverses d'un projet à l'autre ou d'un site à l'autre. Les contraintes imposées par cette intégration est comme toute autre contrainte source de créativité. L'appropriation du concept par le concepteur et la recherche d'intégration dès le démarrage des études sont des conditions nécessaires à une bonne intégration. Il s'avère aussi intéressant à l'intégration de mettre à disposition des concepteurs des composants solaires modulables et au design contemporain.

1.4.3 Le design et la modularité des composants

Afin d'inclure des composants solaires dans leur projet, les concepteurs ont besoin d'avoir à disposition un panel de produits avec lesquels il est possible de concevoir de nouvelles enveloppes énergétiques. Le design du produit et sa modularité sont des facteurs pour l'intégration. Le capteur doit pouvoir être un composant de construction au même titre que d'autres. La conception du composant doit permettre à l'architecte de répondre aux diverses contraintes fonctionnelles et techniques ainsi que celles plus spécifiques liées aux particularités du site et du maître d'ouvrage.

Le composant solaire thermique sera décliné avec la possibilité de choisir : le type de profilé, la trame et les proportions, l'alternance des pleins et des vides, les performances et la qualité du vitrage, et la couleur de l'absorbeur.

1.4.4 Le compromis entre l'intégration architecturale et la performance thermique

Afin de récupérer le maximum d'énergie solaire, les composants du système solaire doivent être installés dans des conditions optimales. Toutefois, il est envisageable de s'écarter de ces conditions optimales sans trop perdre en efficacité.

L'orientation des façades, exceptés les cas de plus en plus rares de construction en milieu isolé est rarement optimale pour le rendement du capteur. La façade la mieux orientée comporte aussi souvent des masques, proches ou lointains, végétation, relief ou construction. L'orientation verticale diminue le rendement global du capteur sur l'ensemble de l'année, mais elle est plus favorable pendant les saisons d'hiver et de demi-saison. L'été, cette orientation limite les surchauffes dues aux stagnations. Dans le cas des bâtiments existants, l'orientation de la toiture ou des façades n'est souvent pas optimale et pose donc la question de la recherche de solutions adaptées d'intégration.

Pour conserver un rendement acceptable, une intégration « sauvage » au détriment de la qualité architecturale, semble être un facteur supplémentaire de résistance pour les Architectes

des Bâtiments de France, les instructeurs de permis de construire ou de démobilisation pour des professionnels soucieux de qualité architecturale. L'impact sur le rendement en est un autre pour les maîtres d'ouvrage.

Il s'avère dès lors essentiel de trouver un bon compromis entre l'installation technique des systèmes solaires thermiques actifs, en termes notamment de faisabilité et de productivité, et leur intégration architecturale. L'idée principale est d' « accepter un diminution du rendement énergétique pour gagner en souplesse d'intégration ». C'est pourquoi il est nécessaire de pouvoir évaluer et comparer tout type d'intégration de systèmes solaires thermiques actifs, voire d'en signaler quelques perspectives d'amélioration.

Chapitre 2 :
Les technologies solaires dans le secteur bâtiment

2 Les technologies solaires dans le secteur bâtiment

2.1 Principes généraux

L'énergie solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques (principalement entre 0,3 et 3 µm) ou toute autre énergie obtenue par captage du rayonnement solaire. Le rayonnement solaire atteint la surface du bâtiment sous trois formes [Figure 2-1] :

- Le rayonnement direct : C'est la part du rayonnement provenant directement des rayons solaires;
- Le rayonnement diffus : Multidirectionnel, il provient de la réflexion par les nuages ou par les poussières de l'atmosphère;
- Le rayonnement réfléchi : C'est le rayonnement réfléchi par les surfaces environnantes, sol, bâtiments proches, végétation.

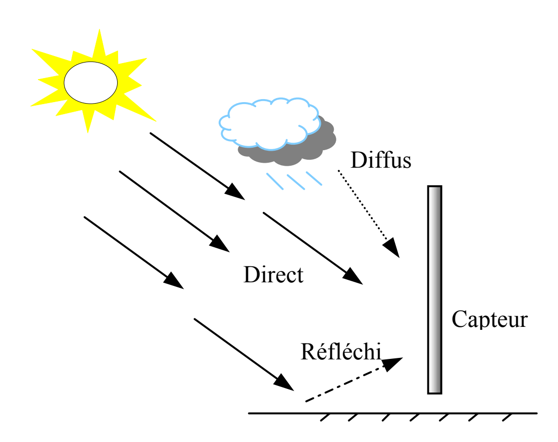


Figure 2-1 : Les trois formes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi.

L'utilisation de cette énergie solaire dans le bâtiment peut faire appel à deux techniques distinctes : le solaire photovoltaïque ou le solaire thermique. C'est cette dernière qui fait l'objet de notre recherche. La technique du solaire thermique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou encore à la climatisation ou au séchage des récoltes.

Pour le solaire thermique, on peut distinguer le solaire passif et le solaire actif. La captation de la chaleur solaire peut être « passive », en ce sens qu'aucun autre fluide que l'air n'est utilisé pour tirer partie, dans l'ensemble du bâtiment, de la chaleur récupérée grâce à des vitrages adaptés dans certains points de celui-ci. C'est ainsi que des baies vitrées orientées au sud stockent de la chaleur dans la masse thermique du bâtiment. Le solaire est en revanche dit « actif » lorsque des moyens mécaniques et des technologies plus ou moins complexes sont utilisées (capteurs, réseau de distribution, ballons de stockage, pompes, ventilateurs, régulation…) pour capter, stocker et distribuer la chaleur reçue du soleil.

2.2 Les systèmes solaires passifs

2.2.1 Principe

Afin de profiter "passivement" de la chaleur et de la lumière du soleil, il faut aménager les bâtiments en fonction des apports solaires. Les techniques passives exploitent d'une part les caractéristiques architecturales des bâtiments, principalement les murs, les fenêtres, les planchers et le toit, et d'autre part les éléments du milieu environnant. Elles captent l'énergie thermique et la stockent.

Le principe du chauffage solaire passif est assuré par des ouvertures vitrées adéquates orientées vers le soleil et une isolation convenable pour éviter les risques de déperditions calorifiques. Il faut aussi stocker la chaleur afin de continuer à chauffer le bâtiment lorsque le soleil ne brille plus et la rediriger vers les zones qui n'en bénéficient pas grâce à la thermo-circulation (mouvement naturel de l'air chaud qui monte) ou des ventilateurs. En milieu tempéré, il faut s'assurer que le logement est bien exposé plein sud. De plus, les vitrages doivent être conçus pour capter au maximum le soleil l'hiver, sans surchauffer la maison l'été. D'ou l'obligation de mettre des occultations solaires. La chaleur est stockée dans les éléments inertes du bâti (murs, dalles, …) ou dans des dispositifs spécifiques de stockage [Figure 2-2].

La climatisation passive consiste à minimiser l'énergie thermique du soleil par diverses techniques d'ombrage (stores, rideaux, toit saillant, plantation d'arbres à des endroits stratégiques, etc.) ou par circulation d'air frais à l'intérieur des bâtiments. Ces techniques se distinguent par leur simplicité, un coût relativement peu élevé et l'emploi harmonieux des caractéristiques architecturales [Figure 2-2].

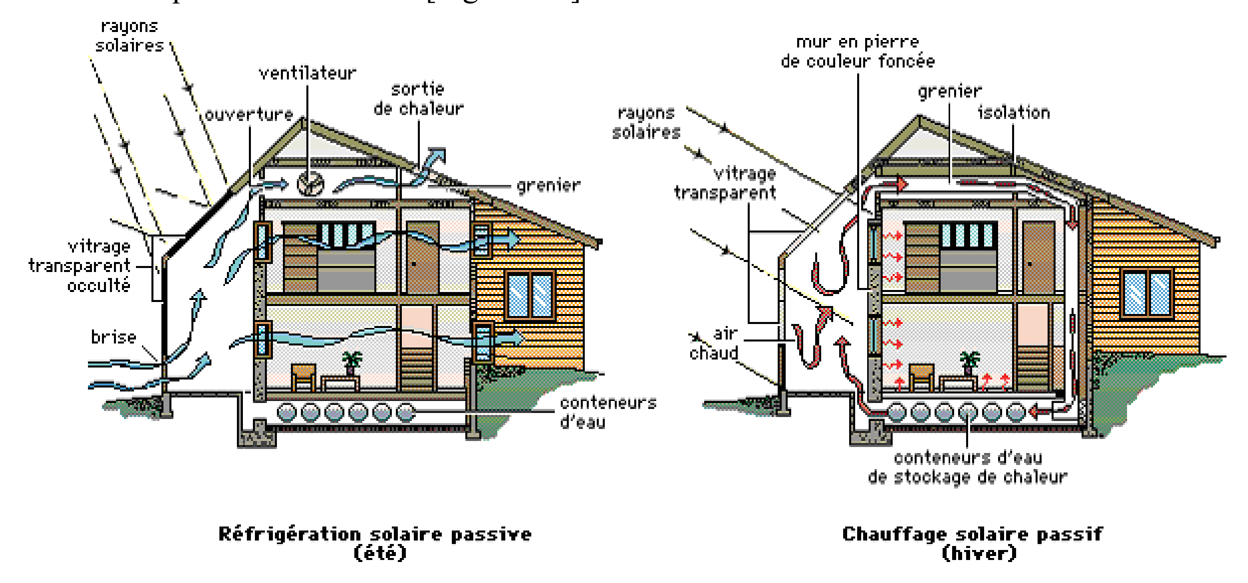


Figure 2-2 : Principe de fonctionnement d'un système solaire passif [Encarta].

Le mur Trombe-Michel, du nom du Pr. Félix Trombe dont les travaux sur les fours solaires sot également très connus, et de l'architecte Jacques Michel, est l'exemple le plus célèbre de

capteur passif. Il associe en fait quatre fonctions : capter la chaleur, la distribuer et la stocker, ventiler en été [Figure 2-3]. L'air circule de bas en haut entre un vitrage et le mur orienté au sud. Il s'échauffe au contact du mur et pénètre dans la pièce. Le mur lui-même transmet lentement par rayonnement infrarouge une partie de la chaleur qu'il a reçue du soleil.

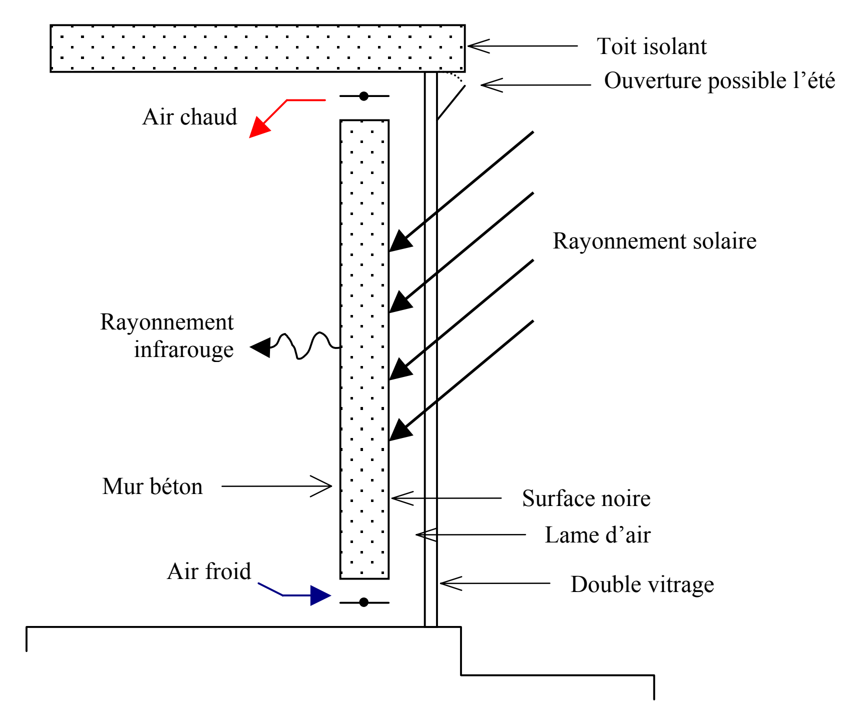


Figure 2-3 : Schéma du mur Trombe-Michel.

2.2.2 Avantages et inconvénients des systèmes passifs

Comme les éléments de ces systèmes sont déjà inclus dans le coût normal de la construction, leur avantage est qu'en général ils ne nécessitent aucune installation d'éléments supplémentaires. Ainsi, ils ne contribuent pas à l'augmentation du coût de bâtiment.

D'autre part, on doit savoir contrôler et maîtriser la quantité de chaleur captée pour éviter les surchauffes lors des périodes de la journée fortement ensoleillées. Cela est possible au niveau de la conception en choisissant l'orientation appropriée des espaces de vie ou par la mise en place du système de régulation. Le système de régulation est soit manuel, dans ce cas c'est l'utilisateur qui déplace les clapets, soit automatique ce qui entraîne un coût supplémentaire. Il est de même important d'installer des protections solaires efficaces afin de limiter la quantité de chaleur reçue. La chaleur du côté ensoleillé du bâtiment peut être distribuée vers les zones plus froides à l'aide des ventilateurs. Pour éviter les pertes thermiques importantes pendant la nuit et pendant les périodes de moindre température externe, il est conseillé d'utiliser les fenêtres thermiquement performantes ou des isolants mobiles supplémentaires du côté intérieur du vitrage.

2.3 Les systèmes solaires thermiques actifs

Un système solaire thermique actif est « un dispositif destiné à intercepter le rayonnement solaire en vue de sa conversion thermique et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur »[3].

Une vision structurelle du système mènera à une compréhension du système réel. La structure qui représente le système ne doit pas être confondue avec le système réel. Le système est séparé de son environnement, avec lequel il constitue un univers, par une frontière - définie dans l'espace-temps et qui résulte donc d'un choix fait par l'observateur - traversée par des flux de matière, d'énergie ou d'information [MICHEL, 1994].

Pour un système solaire de production d'eau chaude, le système est composé du capteur, d'un échangeur de chaleur, d'un ballon de stockage, de tuyauteries et de pompes [Figure 2-4].

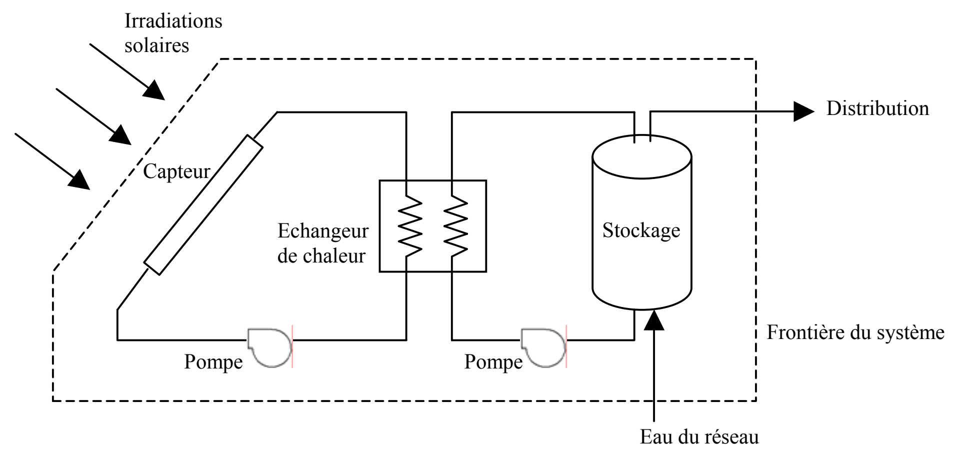


Figure 2-4 : Représentation structurelle d'un système ECS.

Les composants, processus et effets qui font partie du système sont désagrégés en sous-systèmes et en interactions entre ces sous-systèmes. Les sous-systèmes sont définis par les entrées, les sorties, les caractéristiques du modèle et les contrôles. Par exemple, le ballon de stockage peut être considéré comme un sous-système défini par sa forme, sa dimension, et les débits entrants et sortants. L'interaction entre ces composants, en réponse aux variations climatiques et des besoins en énergie, déterminent la quantité d'énergie utile qui sera livrée par le système. Les caractéristiques du capteur seul, par exemple, ne peuvent pas être utilisées directement pour calculer la quantité d'énergie qui sera livrée puisque celle-ci dépend de la température de fonctionnement du capteur qui dépend à son tour de la température du stockage.

Du point de vue fonctionnel, le système solaire actif pourra être représenté de la façon suivante [Figure 2-5]:

[3] Définition selon le Grand Dictionnaire Terminologique

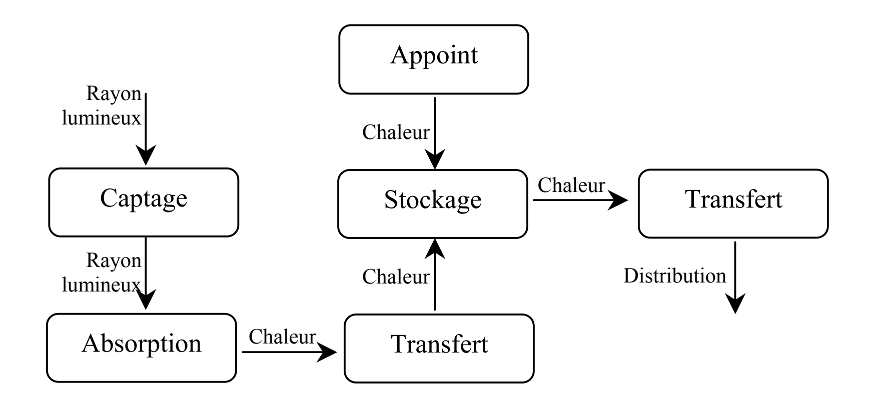


Figure 2-5 : représentation fonctionnelle

L'approche fonctionnelle est utile pour convertir la représentation du système en modèle du système. Nous pouvons nous tromper en pensant qu'il n'y a pas de différence entre les deux approches. Pourtant, l'organisation fonctionnelle permet d'aborder un problème d'un point de vue plus général. Par exemple, l'organisation fonctionnelle présentée dans la Figure 2-5 indique plus clairement que le choix des composants peut être considéré en tant que décisions flexibles des spécifications du modèle, par exemple en combinant les tuyaux et les pompes ensemble dans un sous-système : « Transfert de chaleur ».

Un tel point de vue permettra d'explorer plus facilement toutes les possibilités dans la conversion de la représentation d'un système en modèle de système, puisqu'il aide à spécifier les sous-systèmes et les interactions dans le processus d'analyse. L'approche fonctionnelle nous permet également de réorganiser facilement la représentation d'un système dans d'autres configurations.

2.3.1 Le captage et l'absorption

Le capteur est la source de chaleur de l'installation solaire. C'est là que le rayonnement solaire capté est absorbé pour chauffer le fluide caloporteur. Tous les capteurs visent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques : les capteurs non vitrés, les capteurs plans vitrés, les capteurs sous vide, et les capteurs à concentration. Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

Les **capteurs plans non vitrés** sont peu coûteux et leur usage se développe. Un capteur de ce type est composé de l'absorbeur, métallique ou synthétique (polyéthylène et EPDM) et revêtu d'une peinture sombre et sélective, et d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, parcourus par le liquide caloporteur, résistants au rayonnement ultraviolet (UV) et aux variations de température [Figure 2-6].



Figure 2-6 : Capteur solaire plan non vitré.

Ils ne sont pas isolés si bien que l'augmentation de température obtenue pour l'eau n'excède généralement pas 20°C au dessus de la température ambiante. Leur rendement est bon. Ils sont utilisés le plus souvent pour le chauffage de l'eau des piscines solaires de plein air.

Un **capteur plan vitré** est composé d'un coffre isolant sur lequel est fixé un vitrage (simple ou double) ou certains plastiques transparents. À l'intérieur du coffre est disposée une surface absorbante exposée au rayonnement solaire. Celle-ci s'échauffe et échange ainsi avec le fluide caloporteur, contenu dans les tubes, la chaleur produite par absorption du rayonnement incident [Figure 2-7].

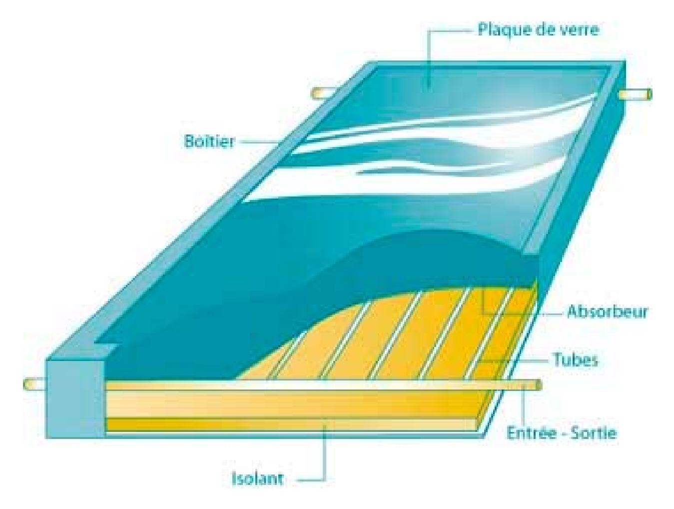


Figure 2-7 : Capteur solaire plan vitré.

L'absorbeur est en général une plaque métallique (en cuivre, en aluminium ou en acier), caractéristique par ses propriétés d'absorption et de conduction de la chaleur. La conversion rayonnement-chaleur s'effectue en surface de l'absorbeur. Les photons qui le frappent sont absorbés par la matière et augmentent l'agitation des molécules, donc la température du matériau exposé au rayonnement. La chaleur absorbée est ensuite distribuée vers les conduits d'eau ou d'air fixés sur la plaque d'absorbeur. La capacité d'absorption de la chaleur varie en fonction de revêtement de la surface extérieure du capteur. Des couches sélectives sont généralement utilisées. Elles ont l'avantage d'avoir une émissivité considérablement réduite

dans le champ des longueurs d'onde du rayonnement thermique, ce qui diminue les déperditions thermiques.

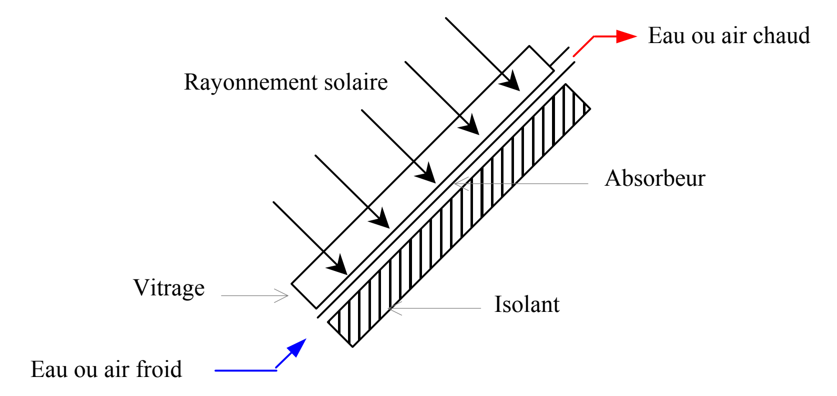


Figure 2-8 : Coupe d'un capteur solaire thermique plan.

La performance et la durée de vie d'un capteur dépendent toutefois de la qualité de la réalisation et de son installation (schéma hydraulique, régulation…). Les capteurs commercialisés actuellement sont le résultat d'une longue mise au point. L'étanchéité entre le vitrage et le coffre, la liaison thermique entre la tôle noire de l'absorbeur et le tube noir parcouru par l'eau, les qualités optiques des matériaux (transparents ou absorbants), autant de domaines dans lesquels des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années.

Les **capteurs sous vide** sont parmi les plus efficaces et parmi les types les plus coûteux de capteurs solaires. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température souhaitée atteint 50 à 95 ºC et/ou à des applications où le climat est très froid. Ils sont constitués d'une série de tubes de verre sous vide à l'intérieur desquels se trouve un absorbeur qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur [Figure 2-9].

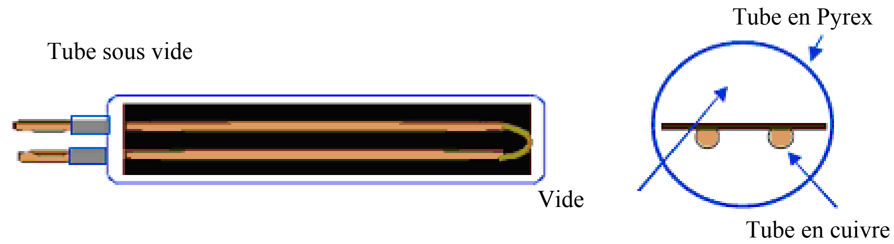


Figure 2-9 : Coupe d'un capteur sous vide [ADEME].

Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleurs par convection sont réduites, permettant ainsi de chauffer l'eau à 85-100°C pour alimenter un groupe de production de froid par absorption, ou pour la production d'eau chaude dans les bâtiments tertiaires (hôpitaux). L'usage de ces capteurs est assez répandu en Europe du Nord et en Suisse.

Les **capteurs à concentration** sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteurs, lentilles ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture. Il existe quatre principaux types de capteurs à concentration :

- Réflecteur cylindro-parabolique [Figure 2-10] ;
- Réflecteur parabolique ;
- Centrale à tour ;
- Capteurs solaires fixes à concentration.

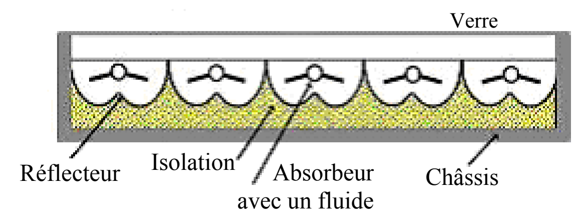


Figure 2-10 : Capteur plan à réflecteur cylindro-parabolique.

Au lieu de frapper directement la surface absorbante, les rayons solaires arrivent sur les miroirs qui les renvoient sur les tubes collecteurs dans lesquels circule le fluide caloporteur. Cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à haute température. Un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs.
En général, ce type de capteur est utilisé pour des applications à haute température et a un meilleur rendement dans des climats où le ciel est souvent dégagé. Les capteurs fixes à concentration peuvent être à circulation de liquide ou à air.

2.3.2 Le transfert de chaleur

L'énergie captée transformée en chaleur est ensuite transférée par circulation du fluide caloporteur dans les tuyauteries vers le système de stockage. Les tuyauteries utilisées sont réalisées en général en cuivre, en aluminium ou en acier galvanisé et protégées avec une isolation thermique contre les pertes thermiques et les intempéries. Le cuivre est un matériau durable, l'aluminium résiste moins bien à la corrosion et l'acier galvanisé est caractérisé par un faible taux de conduction de la chaleur.
Dans beaucoup de systèmes, le fluide caloporteur utilisé est de l'eau. Divers additifs peuvent y être ajoutés tels que de l'antigel (glycol) afin de protéger les capteurs en hiver. Certains capteurs sont prévus pour être vidangés en cas de risques de gel ou de surchauffe.
Deux types de transfert sont possibles :

- par circulation naturelle ou thermosiphon : L'avantage des systèmes qui fonctionnent par thermosiphon est qu'ils ne nécessitent aucun dispositif de régulation et des pompes de mise en circulation du fluide caloporteur. La circulation du fluide caloporteur est due à la différence des températures et des densités de l'eau dans le capteur et dans le ballon de stockage. L'eau chaude monte vers le point le plus haut du système et l'eau froide se déplace du bas de ballon de stockage vers le bas du capteur [Figure 2-11].

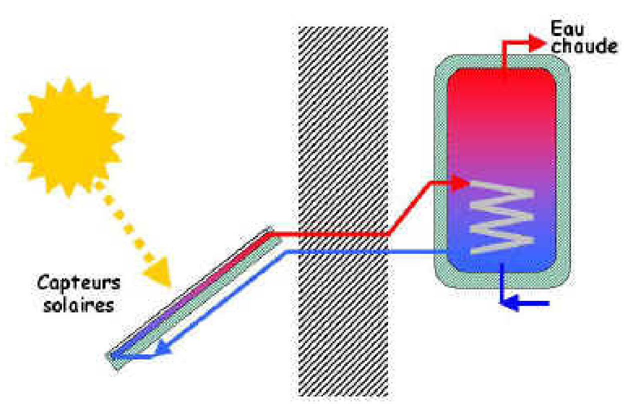


Figure 2-11 : Installation solaire fonctionnant par thermosiphon [Outilssolaires].

Ces systèmes sont en général utilisés dans le cas des installations de chauffe-eau individuel, les applications collectives sont limitées à cause des contraintes de disposition des ballons de stockage ainsi que des pertes de charges induites.

- par circulation forcée: Les systèmes de circulation forcée possèdent une pompe de circulation commandée par un dispositif de régulation fonctionnant à la base de l'écart des températures des capteurs et du ballon, cette valeur est comparée aux différentiels d'arrêt et de démarrage, ceux-ci peuvent être réglables par l'installateur [Figure 2-12].

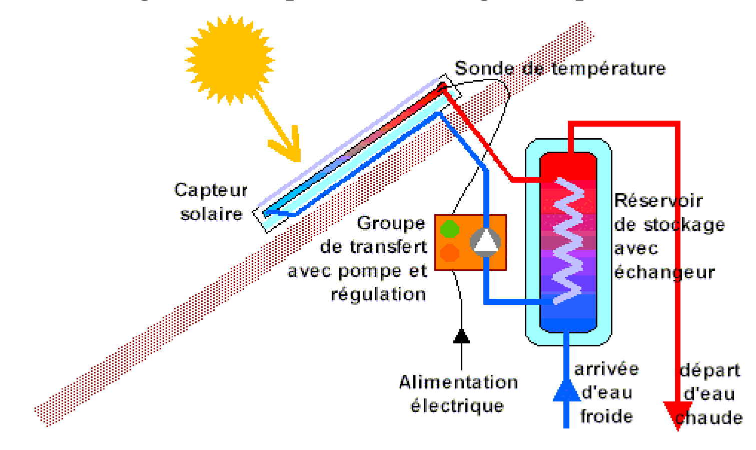


Figure 2-12 : Installation solaire à circulation forcée [Outilssolaires].

La circulation de l'échange peut s'effectuer de deux façons :

- Par circulation directe sans échangeur : c'est le système le plus simple et le moins coûteux, mais il a des problèmes reliés au froid, à l'entartrage, à la corrosion et à l'oxydation.
- Avec échangeur : il y a dans ce cas un circuit primaire dans les capteurs et un circuit secondaire dans le stockage qui récupère la chaleur du circuit primaire.

En général, les échangeurs externes au ballon de stockage sont des échangeurs à plaques et les échangeurs intégrés au ballon du type à serpentin.

2.3.3 Le stockage

Puisque les apports et les besoins énergétiques sont généralement déphasés l'un par rapport à l'autre, on aura besoin du stockage. Le stockage de l'énergie peut s'effectuer sous forme thermique ou chimique.

La forme thermique concerne le stockage sous forme de chaleur sensible et sous forme de chaleur latente :

- La chaleur sensible exprime la variation de température d'une matière de stockage (l'eau ou les pierres). Lorsqu'il se produit un excès de chaleur, la matière est soumise à un cycle d'échauffement et de refroidissement. Le système nécessite un réservoir de stockage et une surface d'échange. La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à la différence des températures d'entrée et de sortie ΔT, à la masse de matériau de stockage m et à sa capacité thermique massique Cp : $Q = m\ Cp\ \Delta T$. L'eau est un matériau de stockage excellent à cause de sa capacité thermique massique élevée, son faible coût et sa stabilité chimique.
- La chaleur latente de fusion résulte du changement de phase d'un composé chimique passant de l'état solide à l'état liquide à une température précise propre à chaque composé. Les substances les plus souvent utilisées pour ce type de stockage sont les sels hydratés (par exemple le sel de Glaubner) dont les points de fusion sont situés entre 25° et 50°C. Cela correspond aux températures qu'il est aisément possible d'obtenir dans les capteurs solaires. Après que la température des capteurs atteint une température suffisante, les sels stockés dans les réservoirs de stockage passent de l'état solide au liquide. Au cours du changement de phase pour une élévation de température donnée, la chaleur absorbée est beaucoup plus grande que dans le cas de la différence de température du stockage à l'état solide ou liquide. La transformation inverse libère une grande quantité de chaleur qui passe ensuite dans le réseau de distribution pour chauffer les locaux et le stockage se refroidit jusqu'à atteindre le point de solidification. Si la température de fusion de la matière est choisie avec soin, la capacité thermique de stockage par ce procédé peut être sensiblement plus élevée que dans les systèmes de stockage à eau ou à lit de pierres.

Le stockage chimique résulte des réactions chimiques qui décomposent les éléments sous l'effet d'un apport de chaleur en produits de la réaction. Ces produits sont ensuite séparés et stockés sans aucune limite temporelle jusqu'à la réaction de reconstitution des éléments d'origine suivant une réaction exothermique.

2.3.4 L'appoint

L'énergie solaire ne peut dans la plupart des cas assurer la totalité des besoins en énergie. Pour faire face à des périodes défavorables (hiver, demi-saison, longue période de mauvais temps),

on a besoin d'une énergie d'appoint. Ainsi, la plupart des unités de stockage sont équipées d'un dispositif d'appoint qui prend le relais en cas de besoin.
En fonction de besoins spécifiques et du type de bâtiment on distingue trois types d'appoint dans les installations solaires :

- L'appoint centralisé et la distribution par boucle de circulation ;
- L'appoint décentralisé et la distribution directe ou par boucle ;
- L'appoint individualisé et la distribution directe.

2.4 Conclusion

Après avoir exposé et analysé les principes fonctionnels communs à la plupart des systèmes solaires thermiques actifs, nous pouvons résumer les principales exigences et qualités requises pour chacune de leurs fonctions principales.

La fonction de captage qui consiste à faire diriger une partie du rayonnement solaire vers l'absorbeur est assurée par les différents types de capteurs solaires thermiques. Les exigences et les qualités principales requises sont :

- L'optimisation de l'orientation et de l'inclinaison des surfaces de captage afin que ces dernières soient orientées perpendiculairement aux rayons du soleil ;
- La limitation des ombres portées sur le champ des capteurs ;
- L'optimisation de la superficie des capteurs par rapport aux besoins ;
- La résistance aux influences des conditions atmosphériques : pluie, neige, grêle, vent ;
- La résistance à des contraintes internes : températures minimales (jusqu'à -30°C en hiver) et maximales (installation en stagnation), brusque variation de température suite à un changement rapide des conditions météorologiques (orage) ou du fonctionnement du système (remise en marche du circulateur), pression de service maximum dans les capteurs.

L'absorption qui consiste à absorber le rayonnement incident et le transformer en chaleur est effectuée par des absorbeurs en cuivre ou en aluminium couverts par des revêtements sélectifs de couleur noire. Les exigences et les qualités principales requises sont :

- Une absorptivité maximale de l'énergie radiante incidente ;
- Une émissivité minimale des rayonnements infrarouges ;
- Une bonne conduction et une faible inertie mécanique;
- Une bonne résistance mécanique et chimique;
- Un drainage uniforme et direct de la chaleur absorbée.

Le transfert de la chaleur absorbée à l'échangeur de chaleur est effectué par le fluide caloporteur qui circule dans des conduites.

Le fluide caloporteur présentant les qualités physiques les plus appropriées est l'eau. Dans le cas de risques de gel, il est préconisé d'ajouter un antigel, en général l'éthylène glycol ou le propylène (non toxique). À noter toutefois que l'ajout d'antigel peut engendrer des pertes de charges plus importantes, une capacité calorifique plus faible et une densité plus élevée, une dilatation plus importante, un coefficient d'échange thermique à travers l'échangeur du ballon de stockage plus faible, ainsi que des problèmes d'étanchéité. Les exigences et les qualités principales du fluide caloporteur se résument en trois principes :

- La protection antigel ;
- La protection contre la corrosion ;
- L'élévation du point d'ébullition.

Les conduites véhiculent le fluide caloporteur entre l'absorbeur et le volume de stockage solaire. Le système peut être avec ou sans vidange. Les exigences et les qualités principales requises pour les conduites sont :

- La résistance au fluide caloporteur utilisé ;
- La résistance à des températures maximales (jusqu'à 150°C) et minimales (-20°C) ;
- La résistance des éléments à proximité de l'absorbeur aux températures maximales lorsque l'installation est en stagnation (jusqu'à 300°C pour les capteurs sous-vide) ;
- La résistance à la pression, réglée par une soupape de sécurité ;
- Un démontage et un remontage aisés pour le remplacement d'éléments défectueux ;
- Une bonne isolation pour entraîner le moins de pertes de charge possible.

Les échangeurs de chaleur, externes, immergés ou à double manteau, réalisent le transfert de chaleur depuis le fluide caloporteur vers le volume de stockage. Ils doivent assurer les qualités suivantes :

- Assurer une transmission maximale de la chaleur ;
- Avoir une bonne isolation thermique afin de réduire au maximum les pertes de charges ;
- Avoir un dimensionnement correspondant à la capacité thermique du fluide caloporteur ;
- Avoir une isolation électrique dans le cas des échangeurs immergés.

Le stockage accumule la chaleur pour combler le décalage temporel entre les ressources et les besoins. Nous avons vu que le stockage peut se faire par l'eau et par les pierres.

Lorsque l'eau est utilisée, il est préférable d'utiliser de l'acier inoxydable, ou de l'acier émaillé s'il y a une anode de protection, ou de l'acier synthétique si le stockage est sans pression. A noter ici qu'il vaut mieux éviter l'acier galvanisé car il présente un risque de corrosion important, el le cuivre car il a une forte déperdition thermique. L'isolation doit être la plus soignée et la plus complète possible afin d'éviter au maximum les pertes de chaleur.

Lorsqu'il s'agit du stockage par pierres, les matériaux choisis doivent avoir une forte inertie thermique, ce qui correspond à avoir un fort pouvoir de stockage thermique.
Le dimensionnement du volume du stockage dans les deux cas, liquide et solide, doit être fonction de l'énergie à stocker, des températures de service et de la place disponible.

Maintenant que nous avons analysé les systèmes solaires thermiques actifs, nous pouvons passer à la seconde étape qui consiste à étudier les différents principes constructifs des bâtiments afin de repérer des éléments et des phases de la construction qui peuvent servir à intégrer des composants solaires.

Chapitre 3 :
Les procédés constructifs du bâtiment

3 Les procédés constructifs du bâtiment

L'amélioration de la qualité des constructions se trouve au carrefour de plusieurs actions :

- D'abord, la conception des bâtiments doit apporter une réponse de qualité aux besoins. Cela s'avère de plus en plus difficile car les bâtiments ont une durée de vie longue et les besoins évoluent vite.
- Il faut ensuite que le chantier soit approvisionné en produits de qualité. Les composants industriels « prêts à assembler » sur site sont aujourd'hui présents partout, même dans les techniques dites « traditionnelles » comme le béton coulé en place ou la maçonnerie.
- Il faut enfin que le travail du constructeur sur le site s'effectue dans les meilleures conditions.

Si la qualité globale de la construction progresse avec lenteur et régularité, les exigences que la société impose aux bâtiments neufs ont en revanche rapidement évolué dans les dernières années. Le traditionnel confort individuel marqué par la poussée des exigences thermiques et acoustiques dans le secteur du logement, a peu à peu laissé sa place au profit de la préoccupation environnementale collective. Cette substitution intègre thermique et acoustique dans une approche plus globale. La démarche connue sous le nom de la Haute Qualité Environnementale (HQE) en est un exemple. Des règles toujours plus strictes dans ces deux domaines, à l'image de la Réglementation Thermique 2005 (RT2005) récente, confirment qu'il n'y aura pas de retour en arrière. La HQE a rapidement pris une place incontournable : tout nouveau bâtiment doit faire la preuve de son impact limité sur l'environnement. C'est une évolution qui touche les matériaux, les équipements, la conception, les nuisances de chantier, la dépollution, la gestion des déchets. D'autres sujets émergent comme la qualité de l'air, non seulement en habitation mais aussi dans les espaces de bureaux.

Dans ce qui suit, sans vouloir (ni pouvoir) être exhaustif, nous exposons un panorama de l'ensemble des grandes familles techniques utilisées couramment sur les chantiers de bâtiment.

3.1 Les règles de l'art

Une construction doit être faite en respectant les « règles de l'art ». Les règles de l'art sont regroupées dans l'ensemble des textes qui encadrent l'activité de construction :

- Les normes de produits: Dans la construction, les normes de produits décrivent les matériaux et composants traditionnels. La norme Française NF cède peu à peu sa place aux normes Européennes sous l'égide de CEN (Centre Européen de normalisation). L'ISO (International Standard Organization), quant à elle, met au point des normes mondiales ;
- Les documents techniques unifiés (DTU) : Les DTU sont des documents qui contiennent les règles techniques relatives à l'exécution des travaux de bâtiment. Ce

sont principalement des cahiers des clauses techniques (CCT), des cahiers des clauses spéciales (CCS) et des règles de calcul. Les professionnels de la filière construction ont établi les DTU pour chaque type d'ouvrage, et se contentent désormais de les faire évoluer ;

- Les Avis techniques et Atex : Les progrès de la science et de la technique incitent les professionnels à rechercher, concevoir, proposer et vendre des produits nouveaux. Afin d'ouvrir les marchés à ces produits, il existe en France, depuis octobre 1971, le système des Avis techniques par lequel, après un examen technique détaillé par le CSTB, des groupes spécialisés constitués de professionnels et d'experts, formulent un « avis » sous forme de document écrit. Un « avis » favorable autorise la mise sur le marché du nouveau produit avec une reconnaissance d'un taux de risque raisonnable pour les assurances.

  Dans le but de réduire les difficultés que rencontrent les promoteurs de techniques nouvelles, lors des premières réalisations, le CSTB et d'autres organismes ont pris l'initiative de mettre à la disposition des innovateurs une procédure rapide pour l'appréciation technique de tout produit, procédé ou équipement ne faisant pas encore l'objet d'un Avis technique et dont la mise en place nécessite une utilisation expérimentale sur un ou plusieurs chantiers : l'Atex (appréciation technique d'expérimentation) ;
- Les règles de calcul et de dimensionnement des ouvrages qui permettent de concevoir et de dimensionner les constructions en fonction du matériau choisi (béton, bois, métal...) et des aspects locaux et de leur destination ;
- Les règles professionnelles établies par les représentants de la filière construction (maîtres d'ouvrage, architectes et maîtres d'œuvre, entrepreneurs, industriels);
- des pratiques d'usage commun non obligatoirement écrites.

Ces règles d'art sont différentes des performances imposées à chaque construction, en fonction de son usage et de sa destination. Nous pouvons cités dans cette deuxième catégorie le code de la construction, la réglementation thermique, la réglementation acoustique et le règlement de la sécurité incendie.

Les normes ou Avis techniques sont des textes de référence en matière de qualité technique. Mais pour l'utilisateur, l'important est la garantie que le produit ou le composant qui servira à construire son mur, son plancher ou son toit soit de bonne qualité. Un système de certification de produits s'est donc développé depuis une vingtaine d'années dans la plupart des grands domaines techniques. Cette certification atteste que le fabricant du produit effectue un autocontrôle régulier de sa production au regard de performances déterminées. Elle est reconnaissable par la marque de qualité apposée sur le produit : marquage « NF » des blocs de

béton, marquage « Cekal » dans les intercalaires des doubles vitrages, marquage « NF-CSTBât » dans les feuillures des menuiseries PVC, etc. Un organisme neutre effectue régulièrement des contrôles de cet autocontrôle.

3.2 Déconstruction et gestion des déchets

La force croissante des contraintes liées au respect de l'environnement et au développement durable conduit à transformer la traditionnelle « démolition » en une « déconstruction » complexe et coûteuse. Déconstruire, c'est construire à l'envers depuis les finitions jusqu'aux fondations, pour finir par la remise en état du terrain.

En parallèle à la déconstruction, le chantier doit procéder en permanence au tri et à la valorisation des déchets. Une déconstruction sélective du bâtiment doit être pratiquée pour éviter un mélange des déchets à la source permettant ainsi un taux de récupération élevé [Figure 3-1]. Une déconstruction suppose qu'un audit préalable à la démolition soit effectué afin d'identifier et de caractériser les matériaux ou éléments récupérables en fonction des filières locales de traitement, de valorisation ou de réutilisation.

Pour les chantiers de construction neuve ou de repose après réhabilitation, il est surtout nécessaire d'éviter le mélange des déchets en effectuant au moins un tri des DIB (déchets industriels banals) et DIS (déchets industriels spéciaux) afin de les orienter vers la filière de traitement adaptée (valorisation matière, énergétique ou élimination).

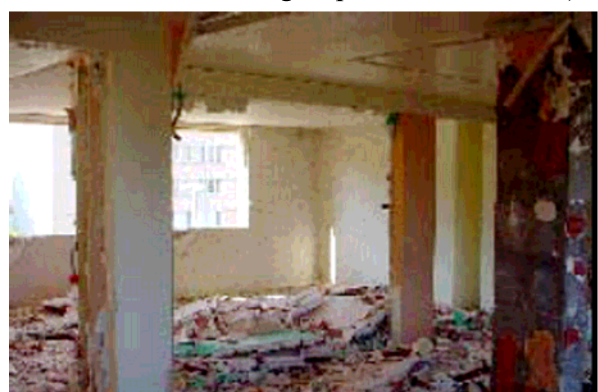


Figure 3-1 : Déconstruction sélective d'un immeuble résidentiel [CSTB].

3.3 Dépollution

On construit de plus en plus souvent sur des terrains ayant déjà accueilli d'autres constructions, et parfois une activité industrielle. Il est donc important d'identifier puis de traiter les éventuelles pollutions existantes. Les polluants se distinguent traditionnellement en polluants minéraux (calcium, mercure, plomb, zinc et chrome) et polluants organiques (hydrocarbures, cyanures, nitrates, pesticides et solvants). Il existe plusieurs techniques de dépollution des sols :

- Les techniques physiques par traitement des polluants : évacuation des sols et eaux pollués, lavage des sols, extraction sous vide dans un sol non saturé d'eau (venting), traitement thermique ;

- Les procédés chimiques : extraction par solvants, lavage chimique ;
- L'extraction électrochimique ;
- La biodégradation : utilisant le pouvoir de dégradation des polluants dont disposent certaines bactéries.

3.4 Fondations

La détermination du mode de fondation d'une construction nécessite d'abord la connaissance de la nature, de l'épaisseur et de la résistance des couches constituant le sous-sol. Ensuite il faut adapter le terrain à la construction à réaliser. Enfin, il sera possible de mettre en œuvre les fondations qui porteront les structures.
Parmi les techniques d'investigation nous pouvons distinguer les puits de reconnaissance, les sondages mécaniques et les reconnaissances géophysiques du sol.
Les ouvrages d'assise sont appropriés, d'une part, à la portance des sols d'assise, et d'autre part, aux différents types de structures porteuses des constructions.

Les fondations superficielles transmettent les charges au sol par l'intermédiaire de leur surface de contact. Elles sont utilisées dans les cas courants et simples, c'est-à-dire elles résistent bien aux charges d'ordre de grandeur moyen. Le sol de leur assise de fondation doit être résistant et en équilibre avec les charges apportées par les fondations.
Parmi les fondations superficielles on distingue :

- des semelles, qui servent des fondations des poteaux ;
- des semelles continues, utilisées sous les murs ;
- des dallages, utilisés dans les cas de l'eau de pluie et l'eau souterraine sans pression ;
- des radiers et des cuvelages, résistants contre l'eau sous pression.

Les fondations profondes sont nécessaires lorsque le sol présente une faible résistance en surface et que des couches inférieures sont reconnues aptes à supporter des charges d'ordre de grandeur plus important (cas des grands immeubles, gratte-ciels…). Ce type des fondations transmet des charges dans la profondeur du sol par l'intermédiaire de surface de contact sur toute leur longueur. On distingue :

- Les puits : Lorsque le sol résistant se trouve à moins de 10m de profondeur. En partie supérieure, une galette armée (tête de puits) sert à transmettre les charges ponctuelles;
- Les pieux : lorsque le sol résistant se trouve à des profondeurs supérieures à 10m. Ce sont des pieux préfabriqués battus, des pieux moulés dans le sol (pieux à tube battu, pieux forés), des barrettes, des colonnes ballastées pilonnées, ou des micropieux.

Lorsque des charges, ponctuelles ou réparties, sont à transmettre horizontalement à des puits ou des pieux, on réalise un réseau de longrines reliant les têtes de puits ou de pieux en béton armé.

Les matériaux utilisés pour les fondations doivent présenter une bonne durabilité, être résistants aux actions d'eau, d'humidité et de diverses substances chimiques présentes dans le sol. Les fondations sont des éléments porteurs fabriqués, pour la plupart, en béton non armé ou armé (en fonction d'ordre de grandeur et de caractère des charges leur appliquées), coulé ou préfabriqué. Il existe cependant certaines constructions qui possèdent les fondations en bois (surtout dans les régions avec le niveau de nappe phréatique élevé).

3.5 Ouvrages de maintien des terres

Afin de soutenir les terres et contenir leurs poussées, on réalise des murs de soutènement dans le but de limiter l'emprise du talus. Pour la stabilité de ces murs, il faut éviter l'accumulation d'eau dans les terres qu'ils soutiennent; d'où la réalisation fréquente de barbacanes et d'un drainage au pied du mur côté « terres ». On distingue deux types principaux de murs de soutènement :

- Les murs poids, s'opposant par leur propre poids à la poussée latérale des terres. Ils subissent essentiellement dans leur structure interne des efforts de compression, d'où la possibilité d'utiliser les maçonneries de briques ou de pierres ainsi que le béton non armé ;
- Les murs voiles en « T », offrant grâce à leur forme adéquate une économie de matériaux par rapport aux murs poids. Ils nécessitent cependant un travail plus précis pour la mise en place des armatures et pour le bétonnage en plus faibles sections. Ils peuvent être renforcés par des contreforts arrière ou avant ;
- Les murs en enrochement, de conception identique au mur poids, mais réalisés avec des blocs non gélifs et non friables, dans la gamme des 100/800 kg. Ils sont disposés manuellement on non pas par déversement, de manière à obtenir une compacité optimum (porosité inférieure à 20%). Un organe drainant est mis en place à l'interface entre terrain en place et enrochement.

3.6 Construction en béton

Les bétons sont le matériau essentiel de la plupart des constructions partout dans le monde (en particulier en Europe). Nous distinguons les bétons coulés en place, les bétons précontraints et les blocs de bétons préfabriqués. Ces derniers font partie de la maçonnerie et sont traités dans le paragraphe suivant.

3.6.1 Les bétons coulés en place

Sur un chantier courant, on distingue trois types de bétons coulés en place :

- Le béton de propreté : Ce béton maigre, disposé sur le sol en couche mince, évite au béton de fondation de se mélanger avec la terre, ce qui aurait pour effet de réduire sa résistance ;

- Le gros béton : constitué de gros agrégats et moyennement dosé, ce béton est utilisé d'ordinaire pour les massifs de fondation, les puits et les murs de fortes sections.
- Le béton coffré ou banché, utilisé pour la réalisation des structures des bâtiments.

Le béton armé résulte de l'association de deux matériaux complémentaires : le béton résistant à la compression et l'acier résistant à la traction.

Pour mettre en œuvre un béton sur chantier, il faut le béton proprement dit, les armatures et un coffrage. La mise en ouvre commence par le gâchage et le malaxage afin d'obtenir une matière homogène et ouvrable. La meilleure ouvrabilité d'un béton frais correspond au plus faible frottement interne obtenu avec un minimum d'eau de gâchage. Après avoir malaxé les agrégats, le ciment et l'eau, on coule le béton pendant qu'il est encore humide et maniable. Ensuite on vibre le béton afin de bien répartir les agrégats et d'assurer sa fluidité dans les différentes cavités du coffrage. Au bout d'un certain temps le béton durcit possédant alors toutes ses qualités de résistance.

Les armatures pour le béton armé sont des assemblages de barres en acier, façonnées et assemblées en atelier ou sur chantier, ou préfaçonnées en usine (treillis soudés ou métal déployé).

3.6.2 Les bétons précontraints

Le béton précontraint résulte comme le béton armé de l'association interne du béton et d'une armature longitudinale en acier. Mais dans le béton précontraint on fait subir à l'acier une tension préalable ce qui introduit dans le béton durci une contrainte de compression préliminaire, d'où son nom précontrainte. On distingue deux techniques de précontraintes:

- Précontrainte par post-tension : Elle est réalisée par des câbles sous gaines mis en tension par appui sur le béton suffisamment durci de l'ouvrage et munis d'organes d'ancrage à leurs extrémités (cônes d'ancrage) ;
- Précontrainte par prétension : Elle est réalisée par des armatures tendues avant bétonnage sur des bancs de traction fixes. Après durcissement du béton dans les coffrages entourant les armatures, on reporte les efforts de tension des fils sur le béton en désolidarisant les armatures des organes extérieures de mise en tension. Les armatures gênées, dès l'extrémité de l'élément, dans leur retour à la longueur primitive (donc à une tension nulle) réalisent par leur adhérence au béton la précontrainte de l'élément.

3.6.3 Les coffrages pour béton armé

Le coffrage a pour fonctions principales, d'abord de donner une forme au béton, ensuite de maintenir celui-ci en place jusqu'à ce qu'il y ait atteint sa phase d'auto-stabilité.

Le coffrage comporte généralement une surface coffrante, des éléments raidisseurs de cette surface, des dispositifs d'étaiement, des éléments de réglage et des dispositifs de sécurité.

Parmi les techniques des coffrages traditionnels on distingue :

- Le coffrage de poutre : Le coffrage de la poutre est placé en hauteur sur une série d'étais. Chaque étai est couronné par un chapeau qui sert de prise d'appui aux contrefiches assurant stabilité et contreventement latéral du coffrage. Les planches de fonds de coffrage reposent directement sur les bléchets. Les joues de coffrage s'appuie sur des montants (ou raidisseurs) fixés en pied et contrebutés sur les bléchets. Le serrage provisoire des pièces en bois nécessaires au coffrage se fait à l'aide de serre-joints ;
- Le coffrage de plancher : Le platelage est placé en altitude par une série d'étais réglables et contreventés entre eux par des fils d'acier avec tendeurs à lanterne, chaque fil d'étais soutient une longueur de poutre sur laquelle viennent prendre appui les solives du platelage. Le fond de coffrage ou peau est constitué de panneaux de contreplaqué CTB-C (d'après la norme NF).

Dans le cas d'un bâtiment présentant un caractère répétitif dans sa trame de construction, on a recours aux coffrages industriels verticaux, horizontaux et coffrages tunnel.

Il existe par ailleurs de multiples techniques de coffrages incorporés à l'ouvrage à construire :

- Les prédalles en béton armé ou précontraint ;
- Les planchers métalliques collaborants ;
- Les blocs de maçonnerie coffrants (notamment blocs spéciaux de chaînage) ;
- Les blocs coffrants en matériau isolant (polystyrène expansé).

3.6.4 Les joints

Les joints sont destinés à assurer une liaison durable entre deux éléments de construction. Il existe plusieurs types de joints :

- Les joints de maçonnerie (en mortier) ;
- Les joints de panneaux préfabriqués ;
- Les joints de dilatation ;
- Les joints de retrait ;
- Les joints parasismiques.

3.7 Maçonnerie d'éléments

On appelle maçonnerie un ouvrage composé de matériaux (blocs de béton, briques, pierres, moellons) unis par un liant (mortier, plâtre, ciment).

Les maçonneries les plus courantes dites « maçonneries de petits éléments » sont réalisées à l'aide de blocs de béton, de briques de terre cuite et de pierres.

3.7.1 Murs et parois en maçonnerie

Les murs réalisés en maçonnerie de petits éléments doivent répondre à un certains nombre d'exigences réglementaires : stabilité mécanique, type de mur en fonction de son exposition, isolation thermique, isolation acoustique et tenue au feu.

La stabilité mécanique se traduit par des règles de conception de calcul et d'exécution. Ces règles sont définies dans la norme P 10-202-2 (DTU 20-1) : parois et maçonnerie en petits éléments, et dans la norme EN 1996 (Eurocode 6) : calculs des ouvrages en maçonnerie.

Lorsqu'il s'agit de murs extérieurs (façades), on distingue 4 types de murs selon l'importance du rôle dévolu à la paroi de maçonnerie dans l'étanchéité du mur complet à la pluie [Figure 3-2]. Ils sont définis dans la norme P 10-202-3 (DTU 20-1) :

- Mur de type I : Ce type est un mur qui ne comporte ni revêtement étanche sur son parement extérieur, ni coupure de capillarité dans son épaisseur ;
- Mur de type II : Ce type est un mur qui ne comporte aucun revêtement étanche sur son parement extérieur mais comporte, dans son épaisseur, une coupure de capillarité continue. On distingue le type IIa dans lequel la coupure de capillarité est constituée par des panneaux isolants non hydrophiles, et le type IIb dans lequel la coupure de capillarité est constituée par une lame d'air continue ; par assimilation, cette lame d'air est encore considérée comme continue si elle est traversée seulement par des agrafes métalliques ou par d'autres dispositifs de faibles dimensions, en matériaux non hydrophiles et imputrescibles ;
- Mur de type III : ce type est un mur dans lesquels la paroi extérieure en maçonnerie, non protégée par un revêtement étanche, est doublée par une seconde paroi séparée de la première par une lame d'air continue à la base de laquelle sont prévus des dispositifs de collecte et d'évacuation vers l'extérieur des eaux d'infiltration éventuelles.
- Mur de type IV : ce type est un mur dont l'étanchéité à la pluie est assurée par un revêtement étanche situé en avant (bardage), dont les éléments de fixation ménagent une lame d'air continue et ventilée. Elle peut encore être assurée par la pose d'un revêtement étanche sur la face externe du mur.

Les épaisseurs minimales admissibles pour chaque type de mur sont indiquées dans les règles de calcul et dispositions constructives minimales de la norme P 10-202-2 (DTU 20-1) en fonction de la nature du matériau utilisé.

Les exigences thermiques sont formulées dans l'arrêté du 29 novembre 2000, pour lesquelles existent des règles de calcul (les DTU règles ThU-thG et TH-E) et des solutions techniques dont l'application vaut respect du règlement « Solution techniques RT2005 ».

L'exigence acoustique est exprimée en termes de résultat global pour un logement (ou un local) dans les arrêtés du 30 juin 1999 et peut être respectée en appliquant les « Exemples de solutions acoustiques » du CSTB.

L'exigence de tenue au feu est double : d'une part la réaction au feu pour laquelle les blocs en béton et les briques de terre cuite sont classés dans la catégorie M0 (matériaux incombustibles), et d'autre part la résistance au feu (arrêté du 21 avril 1983), qui caractérise le temps pendant lequel le mur peut jouer le rôle qui lui est dévolu malgré l'action de l'incendie.

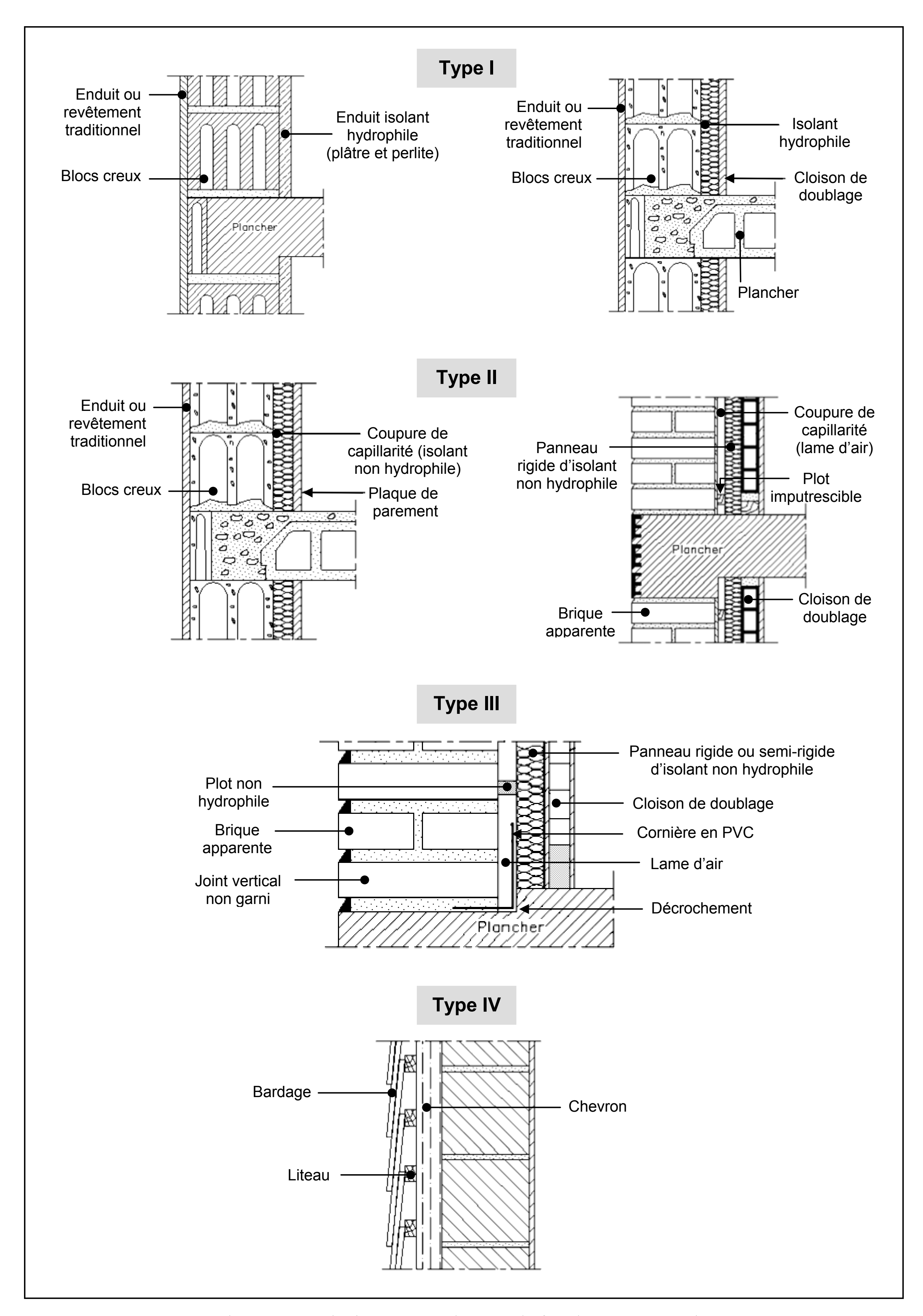


Figure 3-2 : Principaux types de murs de façade en maçonnerie.

3.7.2 Blocs de béton

Les blocs de béton correspondent à deux grandes familles : les « blocs traditionnels » qui font l'objet de normes, et les « blocs non traditionnels » qui relèvent le plus souvent de la procédure d'avis technique.

Les blocs traditionnels peuvent être classés de différentes manières selon :

- la nature du matériau constitutif : béton de granulats courants, béton de granulats légers, béton cellulaire autoclavé ;
- la structure interne : blocs pleins, blocs perforés comportant des petits alvéoles cylindriques, blocs creux comportant des alvéoles débouchant ou non ;
- leur destination : blocs à enduire (parpaings), blocs apparents dont le béton constitutif doit assurer par lui-même l'étanchéité du mur, blocs à bancher ;
- leur mode de pose : pose avec joints épais pour les blocs à maçonner, pose avec joints minces pour les blocs à coller, et pose sans joint vertical pour les blocs à emboîtement ;
- la partie de l'ouvrage à traiter : blocs courants pour les parties courantes, et blocs spéciaux pour les parties d'ouvrage correspondantes

Les caractéristiques de blocs traditionnels sont définies par les normes correspondantes :

- NF P 14-100 : blocs en béton pour murs et cloisons : définitions ;
- NF P 14-102 : blocs en béton destiné à rester apparents ;
- NF P 14-301 : blocs en béton de granulats courants pour murs et cloisons ;
- NF P 14-304 : blocs en béton de granulats légers pour murs et cloisons ;
- NF P 14-306 : blocs en béton cellulaire autoclavé pour murs et cloisons ;
- NF P 14-402 : blocs en béton pour murs et cloisons : dimensions ;

Les blocs non traditionnels peuvent être également classés selon différents critères :

- blocs à enduire dont la forme adaptée permet un gain de temps de pose en réduisant la quantité de mortier ;
- blocs destinés à un montage à sec : sans mortier ou avec remplissage de certains alvéoles verticaux ;
- blocs de coffrage ou blocs à bancher posés à sec ;
- blocs à isolation thermique intégrée : blocs maçonnés, blocs montés à sec, blocs coffrage ;
- blocs acoustiques : blocs absorbants acoustiques, blocs destinés à améliorer l'isolement acoustique.

Pour les blocs considérés comme non traditionnels c'est la commission des avis techniques qui précise leurs caractéristiques cas par cas.

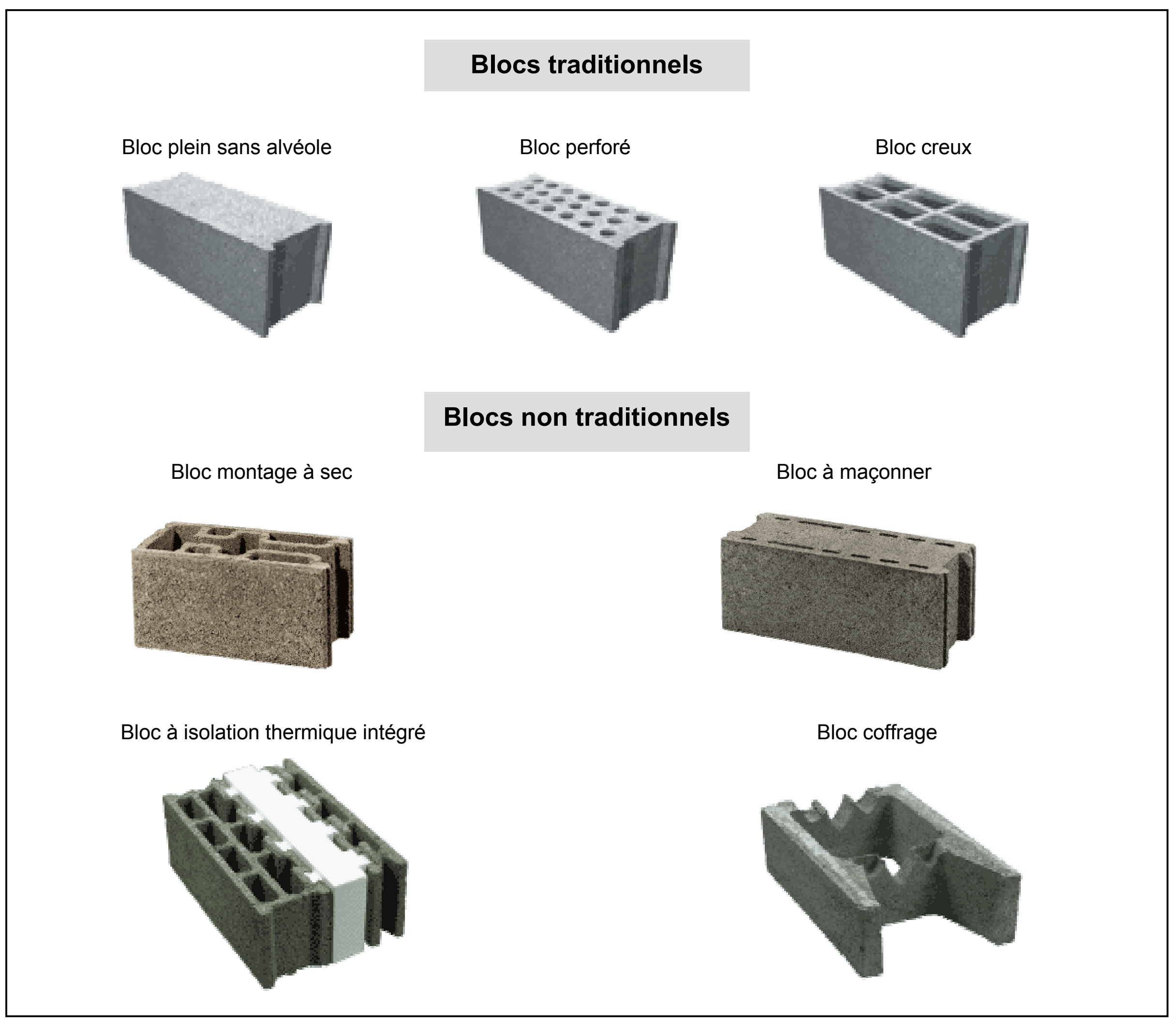


Figure 3-3 : Exemples de blocs de béton.

Les blocs servent à construire des murs et doivent souvent assurer une fonction de portance. Une de leurs propriétés essentielles est la résistance à l'écrasement.

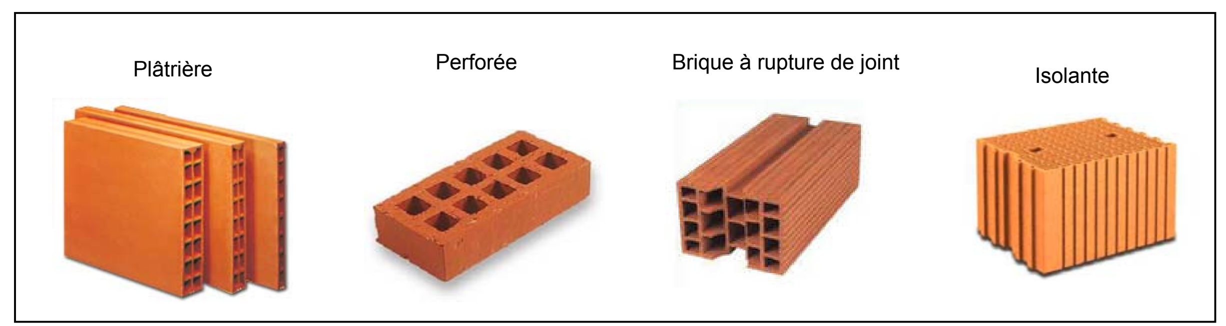
3.7.3 Briques de terre cuite

Pour satisfaire aux différentes exigences requises pour les maçonneries, la brique doit être stable à l'humidité et avoir une porosité limitée. Sa résistance mécanique doit correspondre aux charges appliquées sur le mur. On distingue plusieurs types de briques :

- les briques plâtrières : essentiellement utilisées pour les cloisons intérieures à plâtrer ;
- les briques creuses : dont la superficie des trous est supérieure à 40% de la section totale de la brique ;
- les briques creuses à rupture de joint : le joint de mortier est interrompu par le décrochement des alvéoles centrales, ce qui améliore le comportement thermique et hygrothermique de la paroi ;
- les briques de parement : peuvent être pleines ou perforées. Elles sont posées en façade pour donner au mur un effet architectural ;

- les briques perforées : dont la superficie des trous est inférieure à 40% de la section totale de la brique ;
- les mulots : demi briques de section carrée, perforée ou non ;
- les briques réfractaires : résistantes au feu.

Avant leur mise en œuvre, les briques de terre cuite doivent être humidifiées afin qu'elles n'aient pas tendance à absorber l'eau du mortier et à le dessécher.



Erreur ! Signet non défini. Figure 3-4 : Exemples de briques de terre cuite.

3.7.4 Pierres

On distingue plusieurs types de pierres utilisées dans la construction des bâtiments :

- On désigne par pierres à bâtir les meulières, les moellons, les pierres à chaux, le grès, le marbre et le granit ;
- La pierre artificielle est un aggloméré en forme de parpaing dont la face visible est traitée en aspect pierre ;
- La pierre reconstituée est constituée d'un béton dont le liant est généralement du ciment blanc et dont l'agrégat est sélectionné pour sa blancheur et sa dureté ;
- Les pierres appareillées sont des pierres taillées sur toutes leurs faces, par opposition aux moellons ;

La pierre de taille est une pierre calcaire, appareillée, de dimensions régulières, apte à constituer des murs finis sans nécessité d'enduit.

3.8 Construction en acier

Chaque projet de construction utilisant l'acier décrit ses propres éléments et ses propres assemblages. Selon l'ampleur du projet, les choix économiques et architecturaux, ce projet peut faire appel à des éléments industriels de catalogues ou concevoir ses structures spécifiques.

Construire en acier signifie assembler des éléments par boulonnage, soudure, rivetage à chaud, boulons sertis, ou par axe d'assemblage, afin de constituer une structure. Les assemblages jouent un rôle essentiel dans la construction métallique :

- par leur rôle dans la stabilité de la structure ;
- par leur efficacité et leur simplicité d'exécution sur le chantier ;
- par leur aspect.

En général, les structures en acier désignent des poteaux, des poutres, des arcs, et des assemblages régis par quelques principes simples.

Les systèmes constructifs les plus connus sont :

- le procédé « Cibbap » : Procédé constructif adapté aux bâtiments d'un à quatre étages ainsi qu'aux zones climatiques sujettes aux séismes et aux cyclones. Il repose sur la préfabrication en usine de composants de murs et de façades porteurs, de planchers et de toitures à base de matériaux composites. Pour les façades qui participent à la stabilité générale, ces composants disposent d'une ossature acier (aciers plans galvanisés à chaud ou inoxydables), incorporent un isolant et un revêtement intérieur en plaque de plâtre cartonné. Ils offrent par ailleurs de bonnes performances thermiques et acoustiques. De tels dispositifs de préfabrication autorisent des délais de chantier réduits.
- Le procédé « Styltech » : Procédé constructif en profilés minces en acier pour la réalisation de bâtiments d'habitation individuelle à rez-de-chaussée ou R+1 isolés, jumelés ou en bandes à structures indépendantes, et d'habitation individuelle à rez-de-chaussée en bandes à structures non indépendantes. Le procédé consiste à réaliser une ossature métallique à base de profilés à froid en acier galvanisé, assemblés par vis auto-perceuses, comprenant côté extérieur un bac acier galvanisé nervuré et un système d'isolation thermique extérieure (enduit mince ou hydraulique sur isolant ou vêture), et côté intérieur un habillage en plaques de plâtre vissées sur un réseau de profilés en acier ou directement sur les poteaux. Les planchers sont réalisés soit en béton avec bac acier collaborant ou coffrage acier perdu, soit en panneaux bois vissés sur poutrelles acier.

3.9 Construction en bois

Le bois présente un avantage non négligeable en matière de délai de construction et d'économie de chauffage. La construction en panneaux préfabriqués dans un atelier et assemblés sur le chantier est utilisée dans la majorité des opérations de maisons à ossature bois. Les règles de conception, de fabrication et de mise en œuvre de la maison à ossature bois sont définies par les normes NF P 21-204-1 (DTU 31-2), NF P 21-102, et les règles BF 88 (DTU P 92-703). La marque « CTB Structure » protège la conception et fabrication des panneaux.

Les éléments constitutifs d'une maison à ossature de bois sont :

- Le soubassement : Les éléments de structure de mur reposent toujours sur un ouvrage de soubassement composé d'une fondation et d'un muret en maçonnerie couronné d'un chaînage en béton armé solidarisé à un plancher à entrevous en polystyrène expansé ou désolidarisé d'un dallage isolé. Une coupure de capillarité, dont la hauteur au dessus du sol est supérieure à 20cm, est interposée entre la maçonnerie et la structure en bois ;

- L'élément de structure de mur : est constitué d'une ossature en bois résineux, cadres et montants de petite section 36mm × 97 ou 122 mm à l'écartement de 0,40 ou 0,60 m, assemblée par pointes ou agrafes sur un voile travaillant en panneaux de contreplaqué. Les murs périphériques sont complétés de l'intérieur vers l'extérieur par une plaque de plâtre BA 13, un film polyéthylène, un matelas isolant fibreux minéral, un pare-pluie et un revêtement extérieur du type clin. Les murs intérieurs sont simplement complétés par une plaque de plâtre BA 13 sur chaque face ;
- L'élément de Plancher : est constitué d'un solivage en bois massif, qui supporte en partie supérieure un plancher porteur en panneaux de particules de 22 mm et en partie inférieure un faux plafond (BA 13) sur contre-lattage métallique. Les solives prennent appui sur les murs par l'intermédiaire d'une lisse haute qui constitue le chaînage horizontal. L'about du plancher est fermé par une solive périphérique et une entretoise avec incorporation d'isolant dans le vide ainsi constitué.

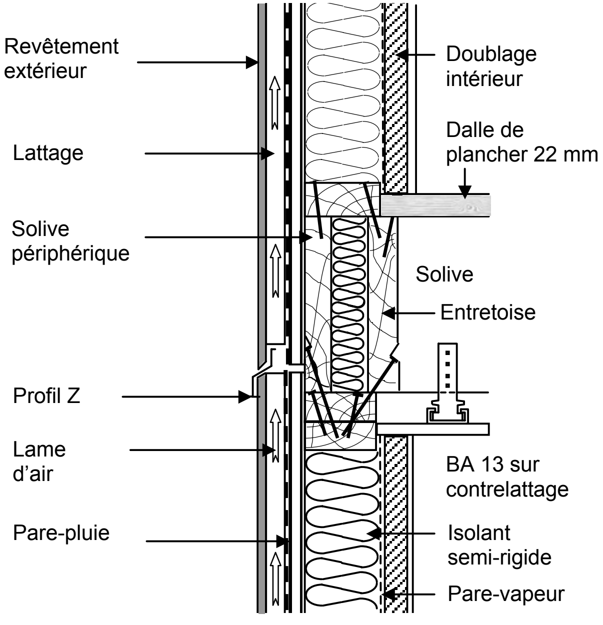


Figure 3-5 : Elément de structure de mur en bois.

3.10 Planchers

Les planchers, éléments horizontaux de la structure, doivent assurer les fonctions suivantes :

- transmission des charges depuis leur point d'application vers les structures verticales ;
- résistance aux sollicitations extrêmes (incendie, séisme) ;
- fonction d'isolation acoustique entre locaux.

On distingue deux familles de planchers : Les planchers construits en béton coulé en place, et les planchers préfabriqués.

Parmi les planchers construits en béton coulé en place, on peut distinguer :

- Le plancher traditionnel à poutres croisées : constitué de poutres principales et de poutres secondaires (solives) solidarisées par une dalle à leur partie supérieure.

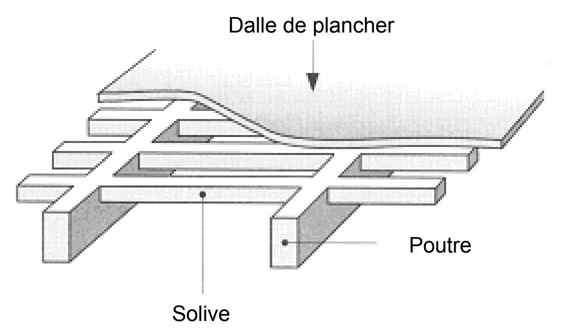


Figure 3-6 : Plancher en béton armé à poutres croisées

- Le plancher dalle pleine : ne comporte aucune poutre intermédiaire. Il repose sur les murs de maçonnerie par l'intermédiaire de chaînages. Quand la dalle pleine en béton armé a pour effet de répartir des charges importantes sur des points d'appuis éloignés, on l'appelle dalle transfert.

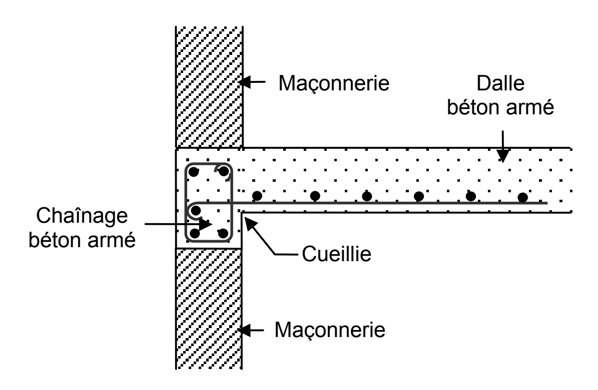


Figure 3-7 : Plancher dalle pleine et chaînage de mur.

- Le plancher champignon : Dalle d'épaisseur constante sans nervure, dont la liaison avec les poteaux est renforcée par des chapiteaux ;



Figure 3-8 : Plancher champignon [Rector].

- Le plancher à coffrage perdu : Le coffrage spécial sert, d'une part de moule au béton, et d'autre part de sous-face prête à peindre du plancher.

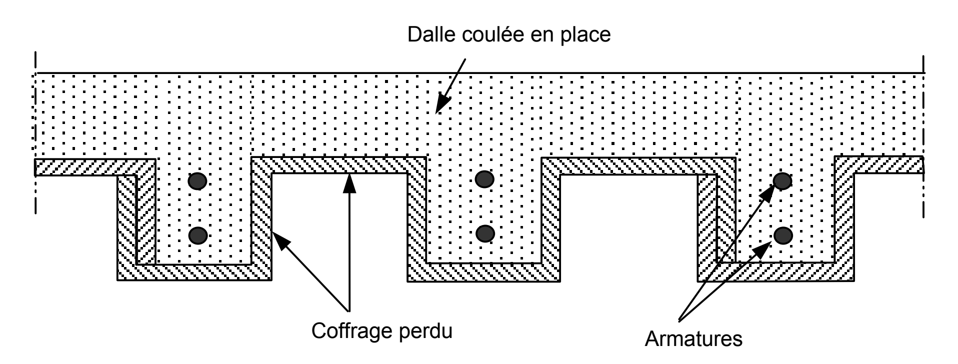


Figure 3-9 : Plancher à coffrage perdu.

Les planchers préfabriqués comprennent essentiellement les poutrelles et les hourdis, et les éléments jointifs avec clés coulées en place.
Les poutrelles sont des produits préfabriqués structurels linéaires de faible section, destinés à être associer à d'autres produits préfabriqués (entrevous) et à du béton coulé en œuvre pour former un plancher. Elles constituent en tout ou partie le système résistant du plancher. Elles peuvent être à treillis métallique ou en « T » renversé. Dans les deux cas, les poutrelles relèvent de la procédure d'Avis technique. Les exigences relatives à ces produits sont définies dans le cahier des prescriptions techniques « Planchers » de novembre 1996.



Figure 3-10: Construction d'un plancher en béton armé avec poutrelles et hourdis.

Les entrevous sont des éléments intercalaires reposant sur les talons de deux poutrelles voisines. Ils sont définis par la norme NF P 14-305 qui précise notamment les caractéristiques physiques et mécaniques pour les 3 types d'entrevous : entrevous de coffrage résistant, entrevous porteurs simple, et entrevous à table de compression incorporée.

3.11 Façades

La façade est souvent l'élément le plus complexe d'une construction. Elle doit assurer les fonctions suivantes :

- Étanchéité à l'eau et à l'air : C'est la fonction la plus sensible d'une façade, et la source de nombreux désordres ;
- Isolation thermique : La façade, avec la toiture, est la principale source d'échanges thermiques avec l'extérieur;

- Isolation acoustique : La façade est la principale barrière au bruit qui protège les espaces utiles de tout bâtiment ;
- Sécurité et sûreté : La façade sert à protéger contre les tentatives d'intrusion dans un bâtiment et est utile en sécurité incendie ;
- Aspect : La façade est l'expression de l'architecture du bâtiment ;
- Et parfois elle doit assurer aussi une fonction de stabilité, comme dans le cas des façades porteuses et des façades participant au contreventement du bâtiment.

En général, on distingue trois familles de techniques de façades : Les façades lourdes, les façades légères et les façades double-peau.

3.11.1 Les façades lourdes

Dans cette catégorie on trouve :

- Les façades en maçonnerie ;
- Les façades en béton coulé en place, qui sont généralement porteuses ;
- Les façades préfabriquées (en béton) qui peuvent être constituées soit par des allèges, soit par des panneaux de façades complets [Figure 3-11].

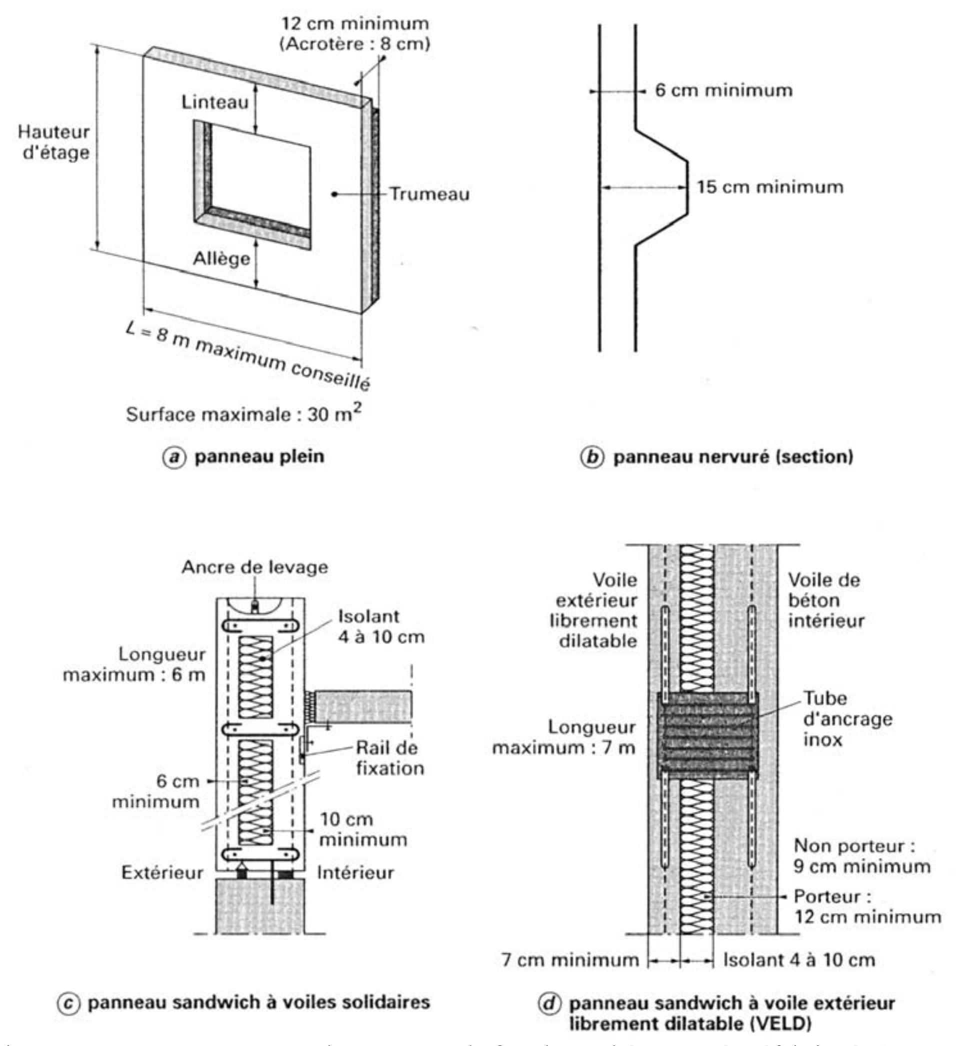


Figure 3-11 : Les quatre types de panneaux de façades en béton armé préfabriqués [CERIB].

Dans les constructions neuves, la plupart des façades en béton sont constituées de trois parois : une paroi extérieure porteuse (en béton), un isolant en partie centrale, et une paroi intérieure non porteuse (en plaque de plâtre ou maçonnerie).

En réhabilitation de bâtiments en béton existants, l'isolation par l'extérieure domine. La paroi de béton se trouve alors en position interne, l'isolant au centre et la protection de l'isolant en paroi externe.

Les matériaux isolants les plus utilisés dans les façades lourdes sont les isolants alvéolaires, notamment le polystyrène expansé et extrudé, et la laine de roche.

3.11.2 Les façades légères

Dans cette famille, on distingue :

- Les bardages métalliques : Ce type de paroi est constitué par l'assemblage de plaques métalliques nervurées de grandes dimension .Les bardages métalliques sont classés en quatre catégories : les bardages simple peau, les bardages double peau [Figure 3-12], les bardages double peau composite et les produits plans. Ils sont utilisés le plus souvent pour la réalisation de bâtiments industriels ou d'usage collectif ;

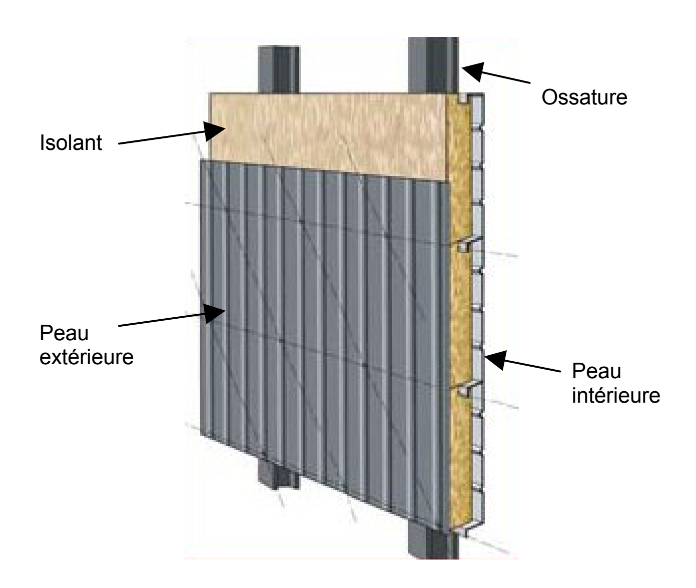


Figure 3-12 : Bardage double peau [Rockwool].

- Les murs rideaux : Le mur rideau est une façade dénuée de toute fonction porteuse. Il comprend une ossature formée de lisses horizontales et verticales raccordées à la structure. Sur cette ossature se fixent des éléments opaques et transparents qui assurent l'ensemble des performances de la façade. Le mur rideau et tous ses joints entre ossature et remplissage doivent, entre les ambiances extérieure et intérieure, réaliser l'étanchéité à l'air et à l'eau. Il doit ainsi comporter une double paroi avec écran anti-pluie en paroi extérieure et étanchéité à l'air en paroi intérieure [Figure 3-13];



Figure 3-13: Mur rideau associant vitrage et panneau [550 W. Adams Chicago, IL].

Les façades en verre sont des façades de type rideau ou semi-rideau dans lesquelles la face extérieure des éléments de remplissage sont des matériaux verriers transparents, translucides ou opaques. Il existe plusieurs types de façades en verre, dépendant du principe de fixation des verres :

- Les façades à vitrage parclosé (VEP) dans lesquelles les éléments de remplissage en matériaux verriers sont maintenus en place par un système de serre-vitres sur l'ossature secondaire, constituée de montants et de traverses en profilés en bois ou métallique (aluminium) [Figure 3-14].

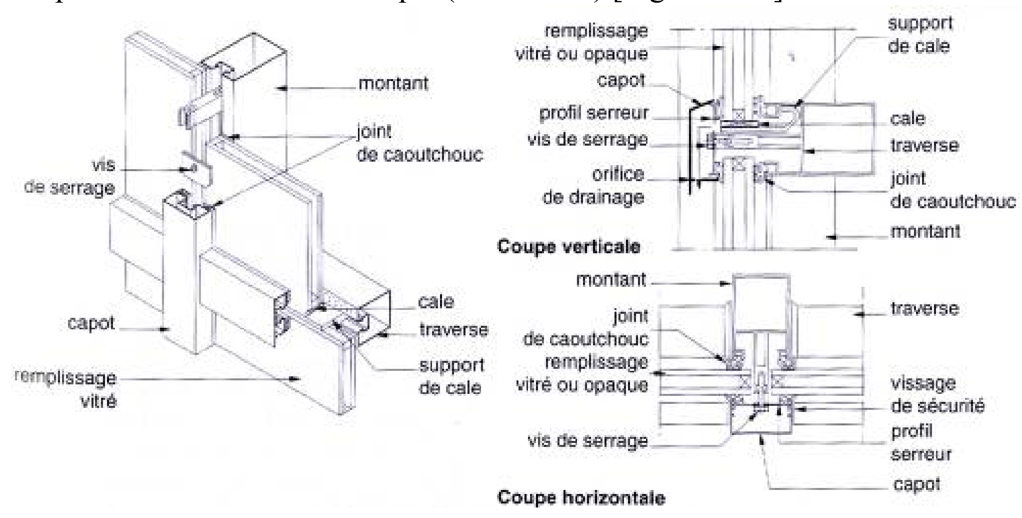


Figure 3-14 : Détail d'une façade VEP [Architectural Systems].

- Les façades VEC sont des façades d'aspect lisse dans lesquelles la fixation du matériau sur son support est assurée par collage. Le rôle du collage est prépondérant puisqu'il transmet à l'ossature les efforts subis par les éléments de remplissage (poids propre, effet du vent).
- Les façades VEA font appel à un dispositif de fixation mécanique afin d'assurer le maintien en place des vitrages : Pièces inoxydables fixées sur une ossature secondaire. L'agrafe métallique est placée à chaque angle, et est

maintenue à l'ossature par une attache qui peut être munie d'une rotule et d'une douille coulissante.

- Les façades panneaux : La façade panneau est une façade légère insérée entre deux planchers directement superposés. Elle s'insère dans la structure porteuse du bâtiment, de telle sorte que la paroi extérieure est interrompue par la structure verticale, murs de refend ou poteau. Elle est généralement composée d'un ou de plusieurs châssis vitrés ouvrants ou fixes, d'un ou plusieurs panneaux de remplissage, de calfeutrements de jeux périphériques, de joints d'étanchéité et des habillages correspondants [Figure 3-15].

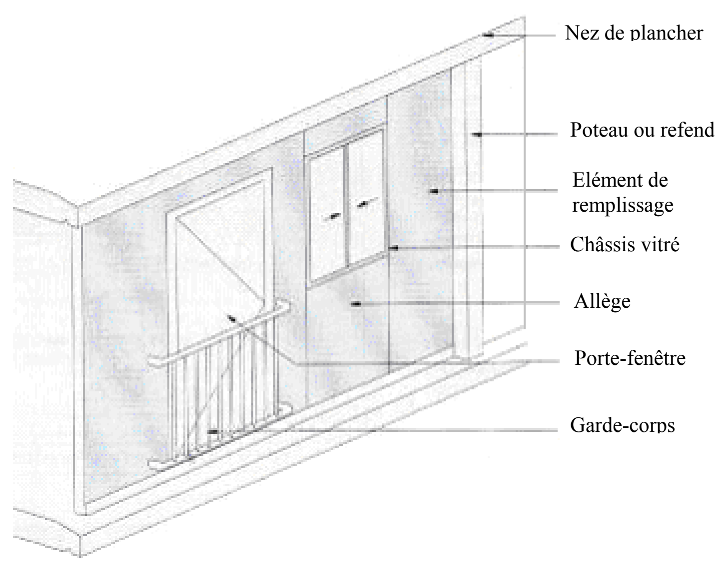


Figure 3-15 : Détail d'une façade panneau [DUTHU, 2004].

- Les panneaux d'ossature bois : Ces panneaux sont en général utilisés dans le cadre de réalisation de maisons complètes à ossature bois.

Le principe même de la façade légère conduit à faire appel à des matériaux différents :

- Isolant thermique : Sous forme de panneau rigide, il est fixé sur la face interne d'un bardage simple ou constitue l'âme d'un bardage double. Les principaux isolants sont des matériaux alvéolaires (polystyrène expansé, polyuréthanne, les mousses de PVC) et des fibres minérales (de verre ou de roche) ;
- Lame d'air : C'est un intervalle continu de faible épaisseur entre deux matériaux dont les faces sont parallèles ;
- Pare vapeur : C'est une feuille ou une membrane, simple ou composite, disposée du côté chaud de l'isolant pour le protéger de l'humidité et éviter les condensations sur son épaisseur ;
- Revêtement : C'est une feuille, une pellicule, un film de peinture ou de vernis, appliqué sur les faces intérieure et extérieure pour donner à a façade son aspect définitif, sa résistance à la corrosion ou son étanchéité à l'eau ;

- Joints : Pour assurer des qualités mécaniques compatibles avec les mouvements dus aux dilatations et déplacements de la façade ;

3.11.3 Les façades double-peau

Une façade double-peau est une façade multicouche principalement vitrée. Une cavité (également appelée couloir d'air ou l'espace intermédiaire) est située entre les couches vitrées. La façade intérieure vitrée peut être munie d'un contre-cœur opaque. Les protections solaires sont généralement placées dans le canal, côté écran ou côté façade. Lorsque le canal est de profondeur suffisante, un caillebotis permet le nettoyage et l'entretien des éléments fixes et mobiles. La Figure 3-16 est une représentation graphique du fonctionnement d'une façade double-peau orientée vers le sud.

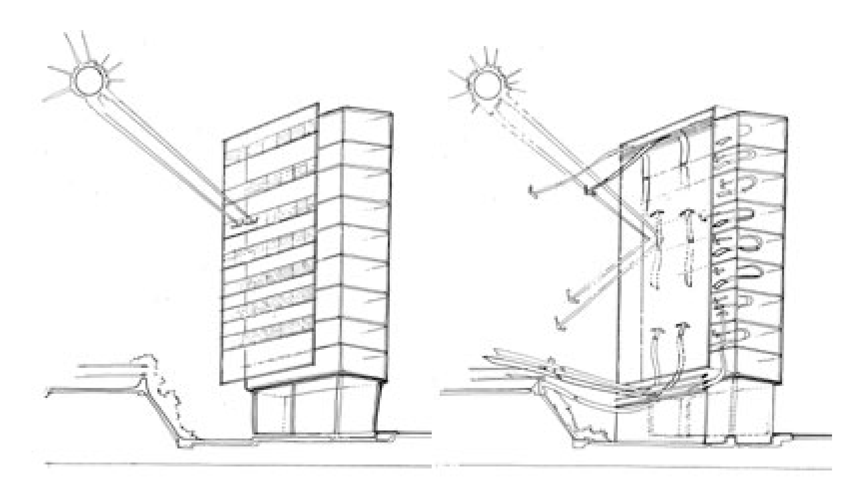


Figure 3-16 : Principe de fonctionnement de la façade double-peau [Sustaining Towers, 2004].

Une façade double-peau, faite sur mesure, respectant les conditions locales (occupants, climat, forme et orientation du bâtiment) peut contribuer à la conservation des ressources naturelles et à l'amélioration du confort des usagers:

- par l'utilisation des gains solaires,
- par une réduction de la demande d'énergie de chauffage en hiver,
- par une utilisation adaptée des protections solaires et ainsi une réduction des besoins d'énergie de rafraîchissement en été,
- par une amélioration de l'isolation aux bruits extérieurs,
- par un refroidissement nocturne efficace,
- par l'augmentation de la durée de vie des éléments protégés de la façade,
- par la prise en charge de fonctions techniques supplémentaires,
- en stockant des systèmes d'air conditionné dans la cavité et/ou la structure, ce qui augmente l'espace disponible au sein du bâtiment.
- par l'amélioration du confort et de la qualité d'ambiance grâce à la ventilation naturelle et une meilleure qualité des conditions thermiques et visuelles.

Les façades double-peau sont différenciées de doubles ou triples façades vitrées conventionnelles par le passage d'air par la cavité entre les peaux internes et externes [Figure 3-17]. La façade ne peut plus être envisagée comme un objet statique. L'air se déplace dans la cavité, modifiant parfois de façon significative ses performances caractéristiques.



Figure 3-17 : Cavité dans une façade double-peau [Lund Institute of Technology]

En plus de cette nature dynamique, on observe également une fluctuation saisonnière dans la façon du fonctionnement de la façade.

Pendant la saison de rafraîchissement, l'air pénètre dans la cavité et emporte la chaleur réduisant ainsi la température de la peau interne ce qui réduit les échanges de chaleur entre le vitrage et le volume d'occupation. Le résultat est une diminution du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et une économie de l'énergie exigée pour rafraîchir l'espace. L'occupant aura plus de confort parce que la température radiante moyenne de l'espace est réduite.

La saison de chauffage prévoit deux scénarios généraux : Dans le premier scénario, le système est fermé, donc pas de déplacement d'air dans la cavité. La cavité se réchauffe, augmentant la température de la vitre intérieure, et réduisant de ce fait les pertes thermiques.

Dans le second scénario, l'air chaud est introduit dans la cavité pour réchauffer la vitre intérieure et atteindre ainsi le même résultat.

Il existe plusieurs concepts différents de façade double-peau. En général, les façades double-peau sont continues au moins sur un étage, l'entrée d'air se fait au niveau de plancher et la sortie au moins au niveau de plancher ci-dessus. Distinguons celles-ci des fenêtres ventilées qui sont des composants intégrés dans les murs extérieurs permettant la lumière du jour et la ventilation et pour lesquelles l'espacement entre l'entrée et la sortie de l'air est inférieur à l'espacement vertical entre le plancher et le plafond.

Les concepts des façades double-peau sont généralement classifiés selon six critères indépendants principaux : le type de ventilation, le mode de ventilation, la hauteur du bâtiment, la composition de la multicouche, la profondeur de la cavité d'air et les matériaux de support.

3.11.3.1 Le type de ventilation

Le type de ventilation se rapporte à la force d'entraînement utilisée pour aérer la cavité d'air située entre les deux façades vitrées. Nous distinguons trois types possibles de ventilation: la ventilation naturelle, la ventilation mécanique et la ventilation hybride.

La ventilation hybride est une combinaison commandée de la ventilation naturelle et mécanique où la ventilation naturelle est employée autant que possible. La ventilation mécanique est seulement employée quand les forces d'entraînement naturelles deviennent insuffisantes pour assurer le flux d'air demandé.

3.11.3.2 Le mode de ventilation

Le mode de ventilation se réfère à l'origine et à la destination d'air circulant dans la cavité. En fonction du composant inclus dans la façade, une façade pourrait adopter plusieurs modes de ventilation. Quatre modes de ventilation sont distingués: ventilation interne, ventilation externe, supplément d'air hybride ou échappement d'air hybride [Figure 3-18].

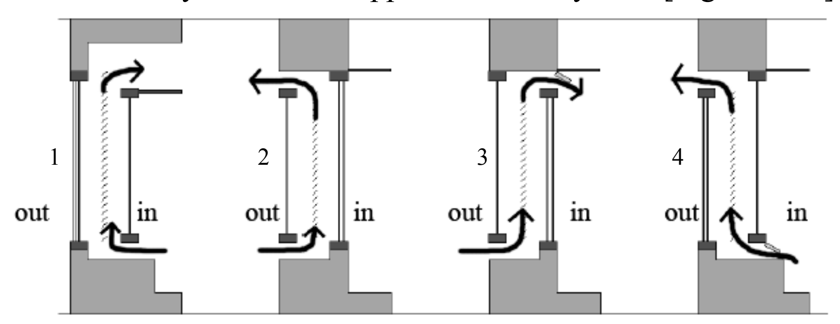


Figure 3-18 : Les modes de ventilation des façades double-peau [Arons, 2000].

3.11.3.3 La hauteur du bâtiment

Les buts des façades double-peau s'appliquent aux bâtiments de petite, moyenne et grande hauteurs. Cependant, Ils ne s'appliquent pas également entre ces derniers. Les façades double-peau sont plus fréquemment utilisées dans les constructions de grande hauteur, pour une raison principale c'est qu'elles permettent aux fenêtres d'être opérables, même lorsque l'extérieur du bâtiment est soumis à des grandes pressions de vent [Figure 3-19].



Figure 3-19 : Vue de la façade double-peau du bâtiment du Commerzbank à Frankfurt.

3.11.3.4 La composition de la multicouche

Les façades se composent d'une série de couches placées de l'extérieur vers l'intérieur. Dans le cas de façades double-peau, les couches consistent principalement de verre (fixé par plusieurs moyens), de gaz et des dispositifs de protection solaire. Il y a infiniment de variétés dans la construction de ces couches. Par exemple, le verre peut être de faible émissivité, trempé, feuilleté ou fritté. Les protections solaires peuvent être en métal ou en plastique, peintes ou polies, perforées ou solides. Le verre isolant peut être rempli de l'air, d'argon, de krypton, ou fermé sous vide. En général, l'arrangement général des couches est étroitement attaché à la stratégie de mouvement d'air. Lorsqu'il s'agit d'une ventilation externe, alors la peau extérieure est composée habituellement d'un vitrage simple, tandis que la peau intérieure sera composée d'un vitrage isolant. Le système est renversé lorsqu'on a une ventilation interne.

3.11.3.5 La profondeur de la cavité d'air

L'intervalle des profondeurs de cavité peut changer de manière significative. Dans les bâtiments existants, la profondeur de la cavité, mesurée de face à face entre les peaux internes et externes, varie entre 20 cm et 140 cm.

Il y a trois types prédominants : Le type compact de profondeur généralement variant entre 20 cm et 50 cm, la dernière laissant assez d'espace pour permettre l'entretien de la cavité et le nettoyage des surfaces à l'intérieur de la cavité. Le type moyen a en général une cavité de 1 m de profondeur, et elle est utilisée comme couloir pour les sorties de secours et pour des raisons architecturales et d'éclairagisme. Le troisième type est le type large qui inclut des atriums et des bâtiments dans les bâtiments.

3.11.3.6 Les matériaux de support

Les matériaux utilisés pour le support des vitres des façades double-peau sont presque aussi divers que les supports des vitres des fenêtres avec quelques différences. Les contraintes de choix des matériaux pour la peau interne sont moindres parce qu'elle est protégée par une peau externe. Plusieurs bâtiments ont ainsi été conçus avec une ossature en bois sur la façade intérieure. Il faut faire attention que les façades agissent comme des capteurs solaires, ainsi ils sont susceptibles d'avoir les températures élevées dans la cavité. Ceci peut endommager les joints des vitres, les supports et même la vitre.

3.12 Cloisons

Les cloisons sont des parois intérieures non porteuses. Elles sont classées suivant leur destination en trois familles :

- Les cloisons de distribution : Telles sont les cloisons intérieures pour pièces sèches et pièces humides ;

- Les cloisons de doublage : Une telle cloison est rapportée devant la face intérieure d'un mur de façade pour constituer une coupure de capillarité et la protection d'un isolant;
- Les cloisons séparatives : Ces cloisons sont placées entre les logements ou entre les logements et la circulation commune. Des exigences particulières sont formulées en ce qui concerne le comportement au feu et à l'isolation acoustique.

Les cloisons peuvent aussi être classées suivant leur destination en :

- Cloison fixe : destinée à rester en place de façon immuable, et dont les éléments constitutifs nécessitent, lors de leur mise en œuvre, des finitions complémentaires ;
- Cloison démontable : dont les éléments constitutifs arrivent finis ou préfinis sur le chantier. Leur démontage s'effectue sans détérioration importante et sont réutilisables sous réserve de remplacement de pièces complémentaires ;
- Cloison amovible : dont les éléments se déplacent dans un système fixe solidaire du gros œuvre (panneaux mobiles, cloisons accordéon repliables ou articulées).

3.13 Toitures

La toiture doit assurer les fonctions suivantes :

- Étanchéité à l'eau et à l'air : L'ensemble d'éléments qui forment la toiture doit être parfaitement étanche à l'air et à toute action d'eau et d'humidité, les exigences sont encore plus fortes pour les toits plats à cause de leur faible inclinaison et éventuelle rétention d'eau ;
- Isolation thermique : Le niveau d'isolation thermique de la toiture doit vérifier les exigences réglementaires et garantir un confort thermique à l'intérieur du bâtiment en fonction d'utilisation de l'espace intérieur de la toiture;
- Isolation acoustique : L'isolation acoustique doit vérifier les exigences réglementaires en matière d'acoustique da la toiture en fonction des locaux à l'intérieur du bâtiment ;
- Sûreté : La toiture sépare le milieu extérieur du milieu intérieur et protège ainsi l'espace intérieur contre les tentatives d'intrusion dans un bâtiment ;
- Aspect : La toiture participe à l'expression de l'architecture du bâtiment ;
- Stabilité : Les toitures doivent résister aux charges et aux forces appliquées, y compris les charges climatiques dues au vent, à la neige et au soulèvement dans le cas des toitures inclinées, et les transmettre aux éléments porteurs verticaux.

La typologie d'une toiture conduit à un classement en fonction de plusieurs critères :

- La forme : simple ou complexe, à versants plans ou courbes [Figure 3-20] ;
- Le climat : surtout quand il s'agit de sollicitations relatives au climat de montagne, avec la présence de neige, par exemple, pendant une longue période de l'année ;

- L'aspect extérieur : couleur des matériaux, état de surface rugueuse (tuile, terre cuite, ardoise), lisse (feuilles métalliques), brillant (tuiles vernissées, tôles d'acier inoxydable), ou avec un relief (tôles nervurées) ;
- La pente : plus ou moins importante ;
- L'accessibilité : s'apprécie par rapport à la circulation des piétons et à celle des véhicules légers ou lourds ;
- L'élément porteur : élément en béton armé, en bois ou métallique.

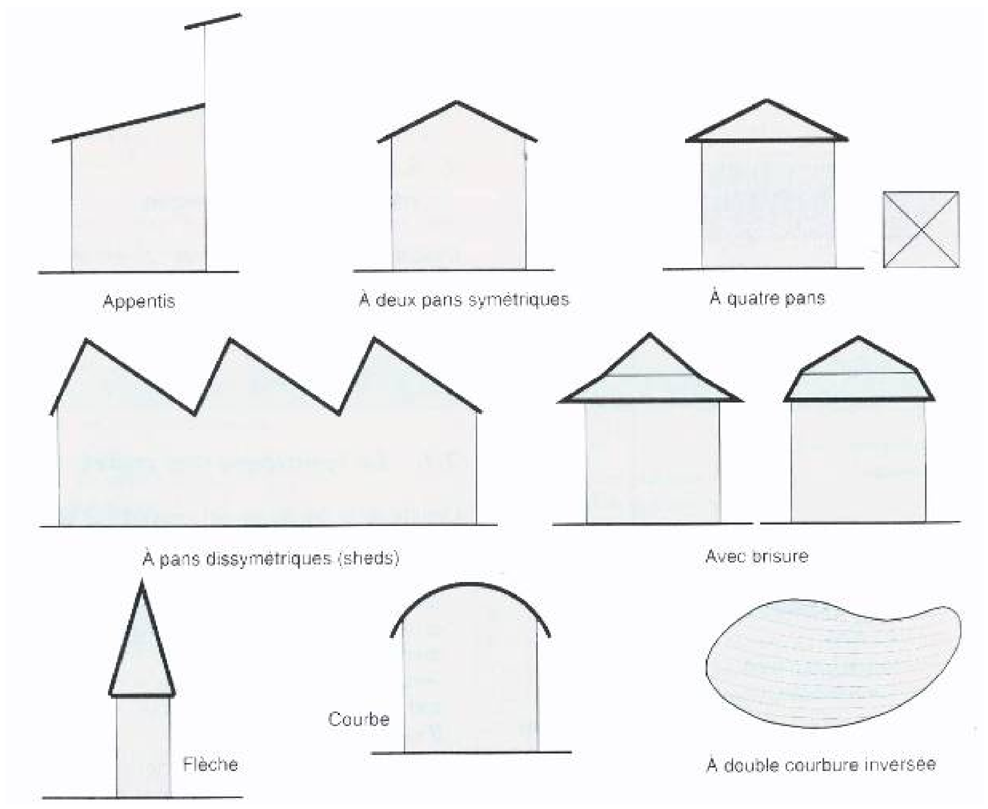


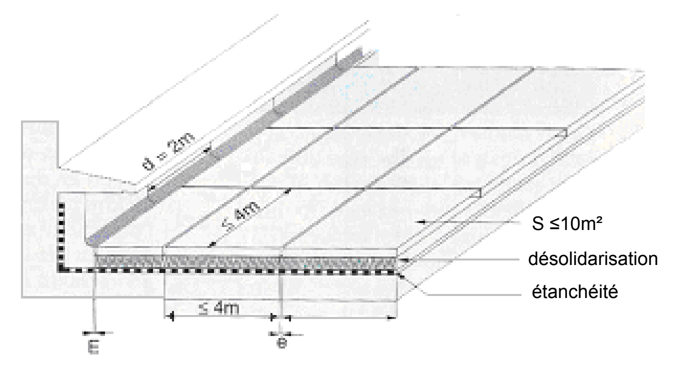
Figure 3-20 : Les principales formes des toits [Cheung, 2006].

La couverture peut être réalisée à partir de petits éléments discontinus (ardoises, tuiles), de grands éléments discontinues (plaques métalliques nervurées, larges feuilles à tasseaux), de grands éléments portés ou autoportés (coques métalliques), ou de membranes textiles.

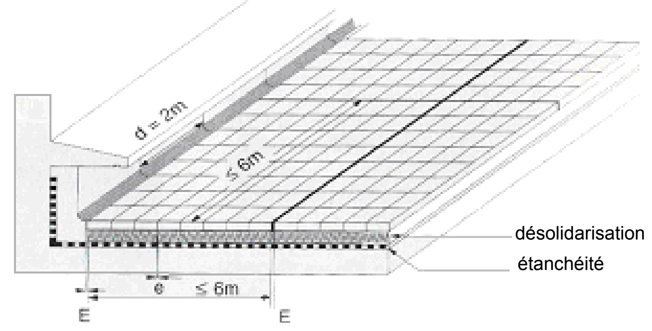
En général, on peut regrouper les toitures en deux catégories : les toits plats et les toits à pente.

3.13.1 Toits plats

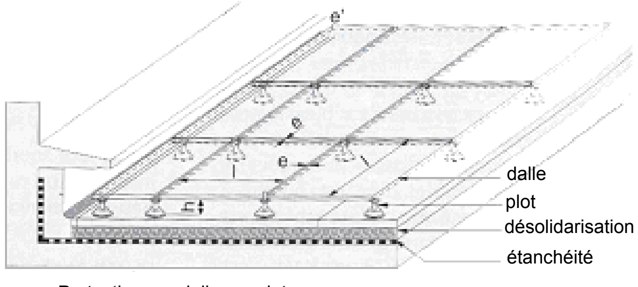
Le toit plat, utilisé plutôt dans la conception d'architecture moderne, est caractéristique par son faible inclinaison (2 – 12°) ce qui augmente la nécessité de traitement correct des traversées de toiture.



a. Protection par dalle fractionnée en béton coulé sur place.



b. Protection par éléments préfabriqués.



c. Protection par dalle sur plots.

Figure 3-21 : Différents types de protection d'une toiture-terrasse [Cheung, 2006].

L'ossature de la toiture peut être faite en béton armé ou précontraint, en entrevous en maçonnerie céramique ou béton et en métal. La surface du toit doit être soignée afin d'éviter la détérioration de l'étanchéité. Plusieurs types de revêtement d'étanchéité et de finition sont possibles [Figure 3-21]. Si le toit plat est accessible au public (toiture-terrasse), il peut être revêtu par le carrelage en béton, en terre cuite ou en bois ou par une couche de béton maigre.
La surface du sol du toit plat non accessible peut être recouverte par un volume d'eau, une couche de gravier ou de la terre avec la végétation.

En raison de construction et de sécurité, les toits plats sont entourés par un acrotère. Les acrotères en béton sont soit bas (hauteur inférieure à 0,3 m), soit haut, coulés sur place ou préfabriqués. Ils doivent respecter les règles de construction appliquées aux ouvrages de maçonnerie ou de béton armé. Les acrotères hauts sont fractionnés par des joints distants de 6 à 8 m, un calfeutrement des joints à l'aide d'un mastic élastomère évite les risques

d'infiltration. Lorsqu'ils sont préfabriqués, ils peuvent être intégrés aux panneaux des derniers niveaux ou réalisés indépendamment [Figure 1-1].

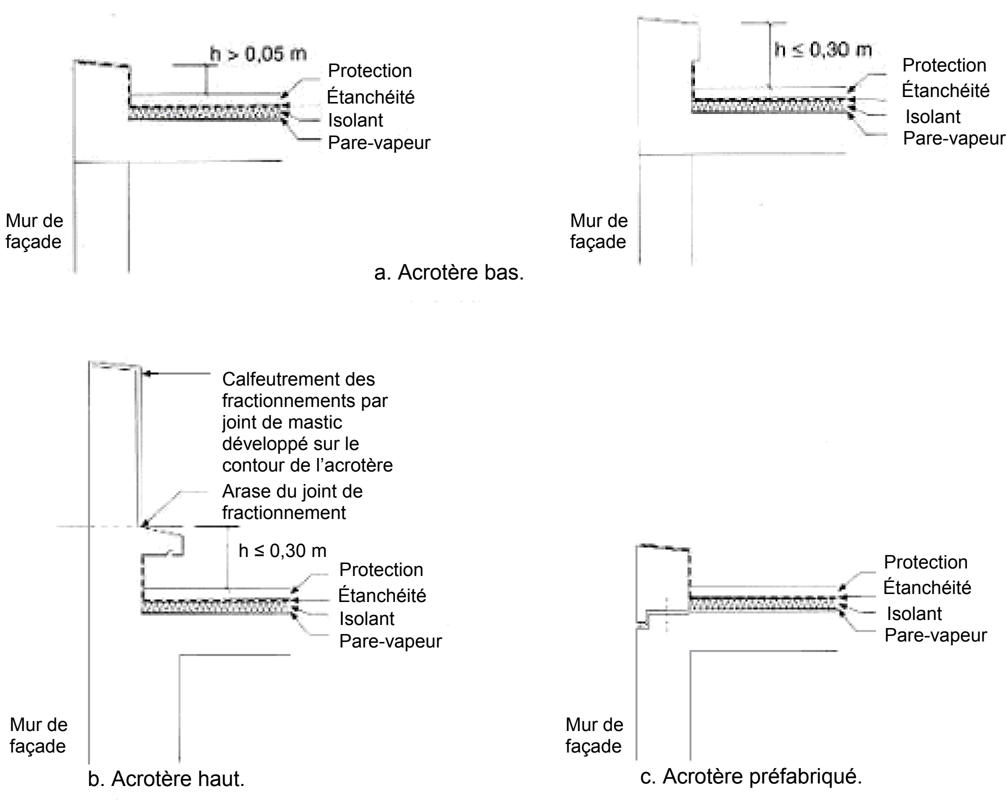


Figure 3-22 : Différents types d'acrotère [Cheung, 2006].

3.13.2 Toits à pente

Le toit à pente, « traditionnel », peut présenter l'inclinaison entre 12-60° et il est non accessible au public. L'inclinaison et la forme d'un toit à pente dépendent de son utilisation, le toit peut être aménagé en comble habitable ou non habitable.

Dans le cas des maisons individuelles la structure du toit est en général en bois, en métal ou en béton. Selon la nécessité le toit peut comporter des fenêtres de toit, des lucarnes et d'autres ouvertures, la cheminée et des traversées de ventilation et d'évacuation des eaux pluviales. Il est donc nécessaire de garantir l'imperméabilité de l'ensemble et surtout aux endroits critiques, par exemple pour les traversées de divers éléments.

3.14 Conclusion

L'analyse des composants et des principes constructifs et de leur fonctionnement nous apporte quelques réponses sur les éléments qui permettent d'intégrer les fonctions propres aux systèmes solaires.

En effet, plusieurs objets et matériaux se distinguent par leur capacité à recevoir une fonction de captage, d'absorption, de transfert de chaleur ou de stockage solaire dans le bâtiment. Les points principaux qui peuvent jouer un rôle intéressant dans la conception préliminaire et qui peuvent guider la réflexion et la conception sont :

- La facilité de la mise en œuvre de l'élément ou du procédé constructif : L'intégration de l'élément solaire devrait se faire d'une façon simple qui n'a pas besoin de recours à une expertise solaire;
- Le rôle de l'isolant dans les différents éléments et son positionnement : L'isolant des façades ou des toitures pourrait se servir aussi comme isolant de l'élément de captage solaire ;
- La fonction de la lame d'air de certains principes constructifs : Elle pourrait servir à recueillir des tuyaux de transfert de chaleur ;
- L'accessibilité pour la maintenance : L'accessibilité aux éléments solaires pour un remplacement ou une réparation est nécessaire pour garantir un bon fonctionnement du système solaire ;
- Le type du bâtiment auquel on va appliquer le procédé constructif et implanter des éléments solaires thermiques : Le type de bâtiment donne une première idée sur les besoins requis (eau chaude pour l'habitat, climatisation pour les bureaux…) ainsi serait connu le niveau énergétique nécessaire (par exemple la température du fluide dans le stockage);
- La conformité d'usage : L'intégration d'une fonction solaire impliquerait des modifications sur la fonction initiale de l'élément. Cela pourrait concerner l'esthétique, la transparence, le poids. Ainsi l'attention serait portée sur cet aspect afin d'éviter de trop modifier l'apparence et les fonctions initiales de l'élément constructif.

Cette analyse offre, à un concepteur ou à un architecte, les premiers éléments nécessaires pour guider la réflexion de la conception, et qui avec l'aide d'un peu d'expérience et d'imagination créative, permettra d'élaborer des propositions d'éléments ou de procédés constructifs qui intègrent les fonctions de captage, d'absorption, de transfert de chaleur ou de stockage solaire dans le bâtiment.

Ainsi nous reprenons chacune des fonctions solaires et nous travaillons sur les éléments et les principes constructifs que nous avons détaillés. Par voie de conséquence, nous préparons une liste de solutions qui peuvent aider à mieux intégrer le solaire dans le bâtiment. Cette liste sera présentée dans la partie suivante.

Partie II
Développement d’une méthode prospective d’évaluation de l’intégration solaire

Chapitre 4 :
Des solutions techniques d'intégration

4 Des solutions techniques d'intégration

En prenant en compte l'ensemble des considérations précédentes relatives à l'intégration décrites dans la première partie, et à partir de l'analyse fonctionnelle des systèmes solaires thermiques et des éléments constructifs effectuée dans les deux chapitres précédents, nous avons établi une liste préliminaire de propositions de construction de nouveaux éléments combinant à la fois la fonction constructive initiale et la (ou les) fonction(s) de production solaire.

Pour concevoir des systèmes solaires intégrés à des principes constructifs remarquables, nous avons établi des règles de définition pour cadrer notre travail. Ainsi, l'élaboration de chaque proposition est basée sur les exigences essentielles retenues par les règles de l'art de construction en prenant en compte les aspects liés à la production, à la mise en œuvre et à l'accès pour la maintenance. L'intégration de la fonction solaire dans un élément de construction de bâtiment peut se faire de deux façons :

- La première consiste à rendre cette fonction invisible, de telle sorte qu'elle ne soit pas perçue ;
- La seconde consiste à mettre en valeur cette fonction et faire que sa présence vis-à-vis des autres éléments du bâtiment soit la plus harmonieuse possible.

Chacune des propositions suivantes est établie selon l'une ou l'autre de ces démarches. Finalement, notre choix s'est axé sur les concepts les plus intéressants à développer. Ces concepts sont analysés en détail et une étude de faisabilité et de mise en œuvre est faite.

4.1 Captage et absorption

4.1.1 Intégration dans les murs en maçonnerie de type I

Domaine d'emploi : Ce type de mur est caractéristique des usines ou industries qui ne demandent pas d'isolation thermique ou acoustique.

Enduit ou revêtement traditionnel
Blocs creux
Isolant hydrophile
Cloison de doublage
Plancher

Proposition d'intégration : Un capteur plan peut être intégré à la façade sans interagir avec les fonctions du bâtiment.

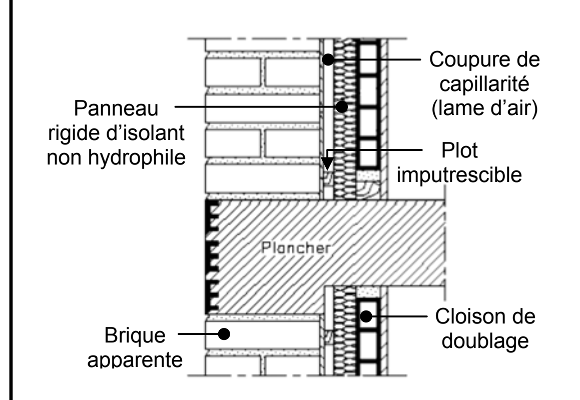
Mise en œuvre : Le capteur est posé directement sur le mur.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Ajout d'isolant pour le capteur.

4.1.2 Intégration dans les murs en maçonnerie de type II

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans l'habitat collectif et individuel, et dans le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : Un capteur plan peut être inséré en façade, par accrochage sur le mur. Cependant la maintenance sera très difficile pour les capteurs situés en hauteur (habitat collectifs, tertiaire), et plus facile pour l'habitat individuel, car accessible seulement depuis l'extérieur.

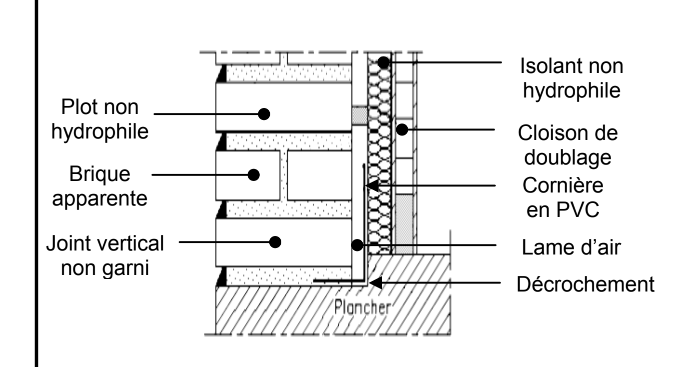
Mise en œuvre : Le capteur est posé directement sur le mur.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Ajout d'isolant pour le capteur sur la face extérieure.

4.1.3 Intégration dans les murs en maçonnerie de type III

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans l'habitat collectif et individuel, et dans le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : Mise en place d'un capteur sur une paroi extérieure doublée par une seconde paroi, séparée de la première par une lame d'air. Les collecteurs sont situés dans la lame d'air.

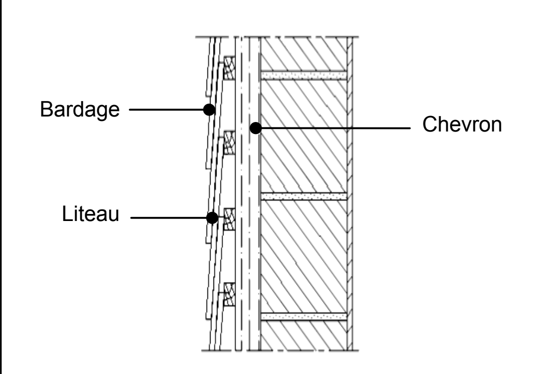
Mise en œuvre : Le capteur est posé directement sur le mur. Attention à l'étanchéité entre les capteurs.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Ajout d'isolant pour le capteur sur la face extérieure.

4.1.4 Intégration dans les murs en maçonnerie de type IV

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans l'habitat collectif et individuel, et dans le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : L'étanchéité du mur de type IV est assurée par un revêtement étanche situé à l'extérieur, ainsi l'intégration d'un capteur en bardage sur ce type d'enveloppe peut créer des ponts thermiques et acoustiques (problèmes d'étanchéité).

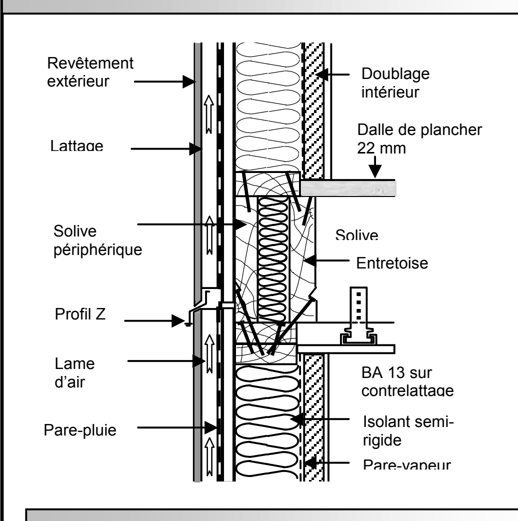
Mise en œuvre : Pose difficile. Interaction des bardages entre eux, étanchéité difficile à mettre en place.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Ajout d'isolant pour le capteur sur la face extérieure.

4.1.5 Façade à panneau bois

Domaine d'emploi : Ce type de façade est utilisé dans l'habitat collectif et individuel, et dans le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : Le bardage en bois peut être remplacé par un capteur solaire, en gardant éventuellement une trame sur le verre du capteur afin de garder l'esprit du bardage. L'isolant déjà présent peut servir d'isolant pour le capteur.

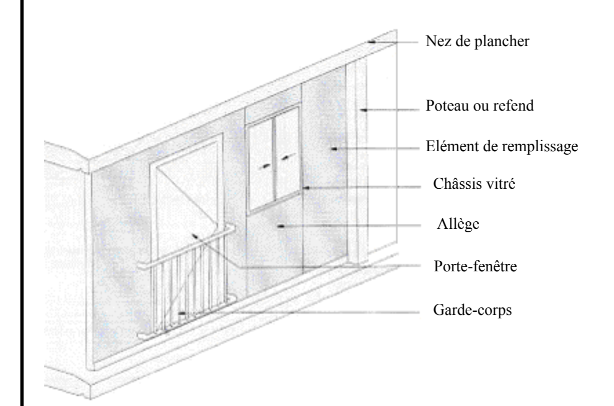
Mise en œuvre : Pose difficile.
Non préfabriqué.
Création du vide pour la lame d'air.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Garder l'aspect esthétique par sérigraphie.

4.1.6 Intégration dans les façades panneau

Domaine d'emploi : Ce type de façade concerne l'habitat collectif, le secteur tertiaire, et les industries.



Possibilité d'intégration : Plusieurs choix sont possibles pour la position du capteur dans le panneau d'une façade. Le capteur peut être situé dans l'allège de la fenêtre, ou dans les éléments de remplissage du panneau (bois ou béton). Cependant il sera difficile de maintenir une bonne étanchéité entre les panneaux de façade ainsi qu'une bonne isolation (pont thermique).

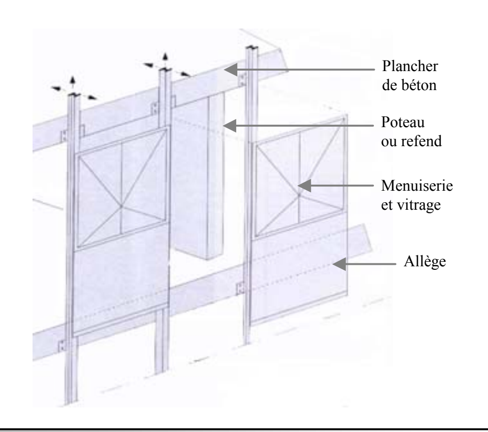
Mise en œuvre : Pose facile. Panneau préfabriqué intégrant le capteur.

Accessibilité : éventuellement par l'intérieur, par démontage du panneau.

Conformité d'usage : Les fonctions principales de la façade sont gardées.

4.1.7 Intégration dans les façades rideaux

Domaine d'emploi : Ce type de façade concerne l'habitat collectif et le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : Un capteur peut prendre la place d'un panneau fixé sur l'ossature secondaire, les réseaux pouvant être situés dans l'épaisseur des montants et des traverses.

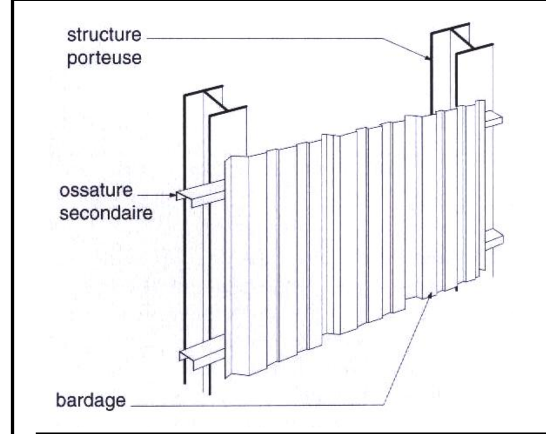
Mise en œuvre : Pose Facile. Capteur intégré dans un panneau préfabriqué.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Les fonctions principales de la façade sont gardées.

4.1.8 Intégration dans les bardages métalliques

Domaine d'emploi : Ce type de façade concerne le secteur tertiaire et les industries.



Possibilité d'intégration : Il est possible d'accrocher un capteur sur les lisses (ossature secondaire) par des pattes de fixation. La mise en place de ce type de capteur est faite directement sur chantier lors du recouvrement de façade (second œuvre). L'isolant thermique utilisé pour l'isolation du bâtiment est aussi isolant thermique du capteur.

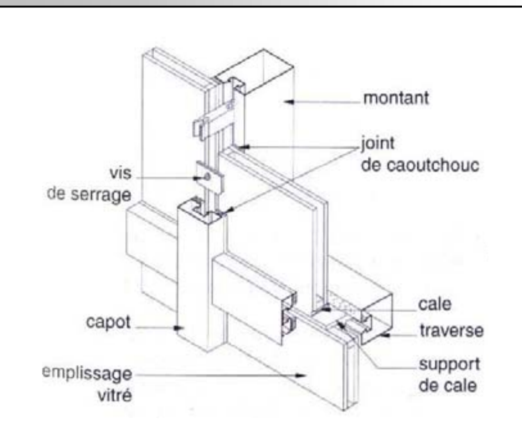
Mise en œuvre : Difficile, Fabrication/pose sur place.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Respect de l'aspect esthétique du bardage ondulé.

4.1.9 Intégration dans les façades vitrées

Domaine d'emploi : Ce type de façade est généralement utilisé dans l'habitat collectif, le secteur tertiaire, et les industries.



Possibilité d'intégration : Ce type de façade permet de faciliter le montage et démontage d'un capteur qui serait fixé entre les capots de la menuiserie du vitrage. Le capteur préfabriqué est mis en place indépendamment de la façade car isolé de la structure. Les réseaux peuvent être ainsi situés dans les capots ou les traverses creuses en acier.

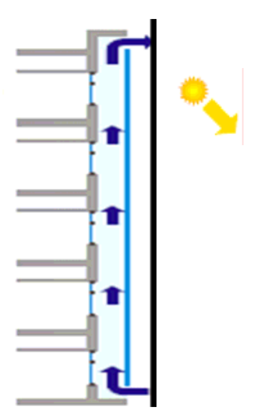
Mise en œuvre : Facile, la pose des absorbeurs et de l'isolant se fait sur place.

Accessibilité : Eventuellement par l'intérieur, sinon par l'extérieur.

Conformité d'usage : Modification de la transparence

4.1.10 Intégration dans les façades double-peau

Domaine d'emploi : Ce type de façade est surtout utilisé dans le secteur tertiaire.



Possibilité d'intégration : Ce type de façade permet de faciliter le montage et démontage d'un capteur qui serait fixé sur les trames de la peau extérieure de la façade double peau. .

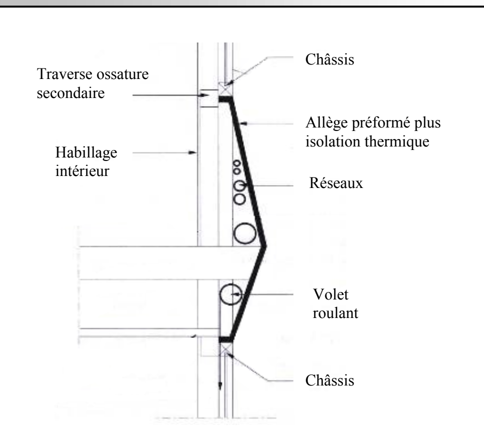
Mise en œuvre : Facile. Les modules solaires préfabriqués industriellement sont posés sur place.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Préchauffage d'air.

4.1.11 Intégration dans les allèges

Domaine d'emploi : Ce type de façade est généralement utilisé dans l'habitat collectif, le secteur tertiaire, et les industries.



Possibilité d'intégration : Un capteur solaire peut être insérer en allège d'une façade légère de type rideau, celui-ci se plaçant devant le nez de la dalle et entre le châssis des ouvertures des étages situés les uns aux dessus des autres. L'ossature secondaire (montant et traverse) maintient le panneau préfabriqué constitué du capteur et d'une partie basse qui recouvre le nu de la dalle.

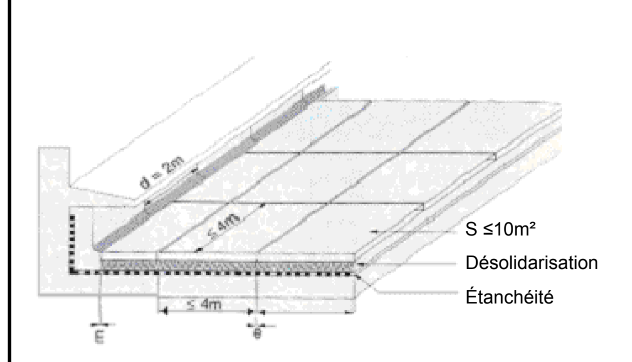
Mise en œuvre : Facile.
Élément préfabriqué.

Accessibilité : par l'intérieur.

Conformité d'usage : Le plan incliné permet un meilleur rendement.

4.1.12 Intégration dans les toitures terrasses en béton coulé sur place

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Un ou plusieurs capteurs remplacent une dalle béton. La difficulté est de maintenir un bon isolement et une bonne étanchéité. De plus la maintenance dans l'état actuel est très difficile car il y a peu de moyen d'accéder au cœur du capteur sans démonter le verre du capteur. Il faudra qu'il soit suffisamment résistant pour supporter la charge d'un homme (verre épais) ce qui aura un impact négatif sur le rendement.

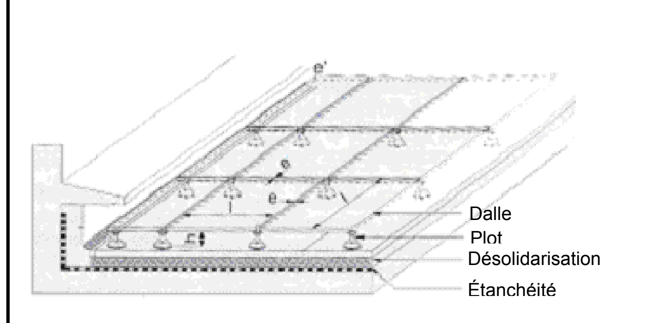
Mise en œuvre : Facile.
Élément de dalle préfabriqué intégrant un capteur solaire.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Résistance au poids propre des usagers.

4.1.13 Intégration dans les toitures terrasses par dalles sur plots

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Un capteur préfabriqué peut venir remplacer une dalle. Poser sur plots la dalle/capteur pourra se démonter assez facilement, et permettre de laisser passer les réseaux. Cependant l'étanchéité entre deux dalles sera assez délicate, de plus ces capteurs étant au sol ils doivent être assez résistant pour soutenir la charge d'un homme se situant sur la toiture terrasse.

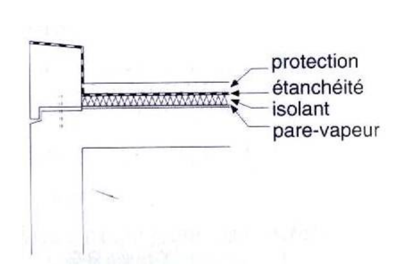
Mise en œuvre : Facile.
Dalle préfabriquée intégrant un capteur solaire.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Résistance au poids des usagers. Etanchéité délicate.

4.1.14 Intégration dans les toitures terrasses par dalles sur plots

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Il est possible de créer un composant préfabriqué qui soit placé en toiture, et en acrotère. Cet élément pourrait être un capteur fixé au mur de façade. Cette solution permet d'avoir un capteur qui pourrait être incliné pour une meilleure qualité architecturale et une meilleure orientation par rapport au soleil, il sera aussi facilement accessible depuis la toiture.

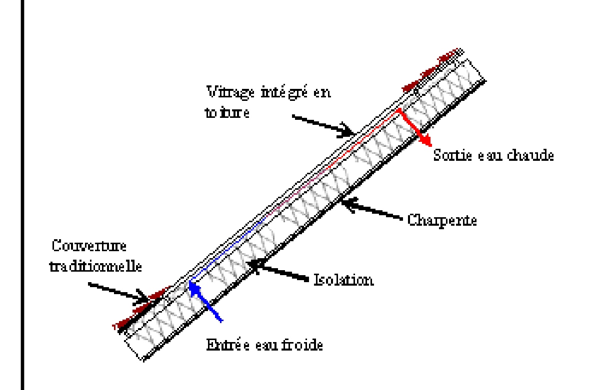
Mise en œuvre : Facile.
Acrotère préfabriqué intégrant un capteur solaire.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Les fonctions principales de l'acrotère sont gardées.

4.1.15 Intégration dans les toits à pente

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Une partie de la couverture sera remplacée par un absorbeur et le vitrage. L'étanchéité du toit sera utilisée comme étanchéité de l'élément capteur. Le capteur sera bien orienté. Un absorbeur de couleur brique pourra être utilisé pour gagner en esthétique.

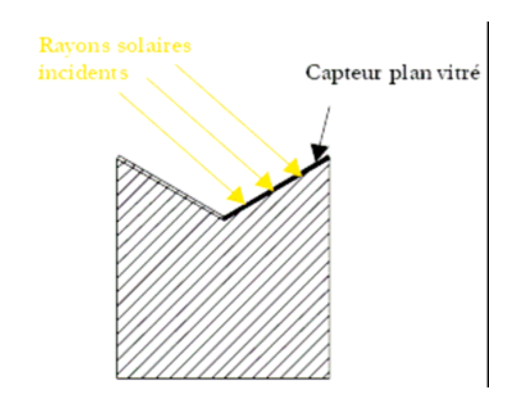
Mise en œuvre : Facile.
Pose sur place des éléments de captage les uns après les autres.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Le plan incliné permet un meilleur rendement.

4.1.16 Intégration dans les toitures inversées

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Une partie de la couverture sera remplacée par un absorbeur et le vitrage. Le capteur sera incliné ce qui augmentera son rendement. L'intégration sera discrète pour plus d'acceptation.

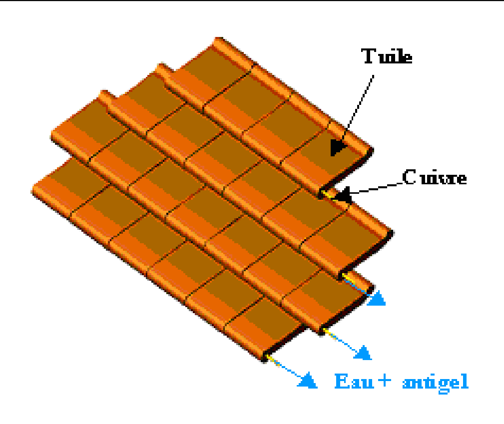
Mise en œuvre : Facile.
Accrochage d'éléments de toiture préfabriqués intégrant les capteurs solaires.

Accessibilité : par l'extérieur.

Conformité d'usage : Occultation des capteurs par le versant opposé du toit.

4.1.17 Intégration dans les tuiles de terre cuite

Domaine d'emploi : Ce type de mur est utilisé dans les secteurs de l'habitat individuel et collectif.



Possibilité d'intégration : Des tuyaux permettant la circulation d'eau sont incorporés dans des tuiles préfabriquées (en terre préfabriquées (en terre cuite), pour récupérer la chaleur accumulée, lors de l'exposition des tuiles au soleil.

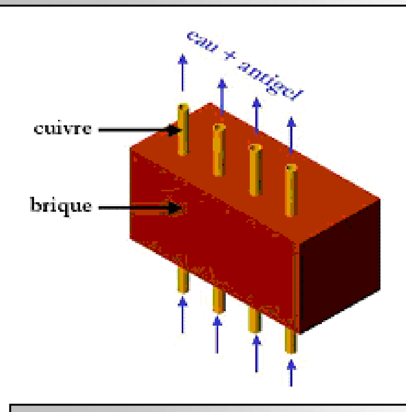
Mise en œuvre : Facile si les éléments sont préfabriqués.
Délicate si incorporation des tuyaux sur place.

Accessibilité : par l'extérieur.
Maintenance difficile

Conformité d'usage : Capteurs invisibles. Surcoût minime.

4.1.18 Intégration dans les maçonneries de brique

Domaine d'emploi : Il concerne tous les murs et les parois maçonneries en petits éléments situés dans une face bien ensoleillée du bâtiment.



Possibilité d'intégration : Des tuyaux en cuivre de circulation d'eau sont incorporés dans la maçonnerie en brique préfabriquée, pour récupérer la chaleur accumulée dans la brique, lors de l'exposition au soleil.

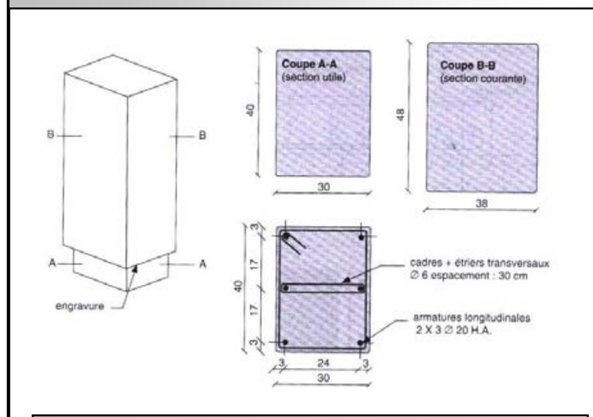
Mise en œuvre : Facile si les éléments sont préfabriqués.
Délicate si incorporation des tuyaux sur place.

Accessibilité : Pratiquement inaccessible. Maintenance difficile.

Conformité d'usage : Capteurs invisibles. Surcoût minime.

4.1.19 Intégration dans les poteaux

Domaine d'emploi : Il concerne tous les poteaux en béton armé ou en bois situés dans les parties bien ensoleillées du bâtiment.



Possibilité d'intégration : Intégration sur la face ensoleillée d'un poteau, Peu de surface de captage à l'échelle d'un poteau, mais sur un ensemble de poteaux porteurs, comme on peut l'avoir dans une construction de type bureaux, la surface de captage devient très suffisante. Entretien par l'extérieur.

Mise en œuvre : Facile.
Pose directe.

Accessibilité : par l'extérieur.

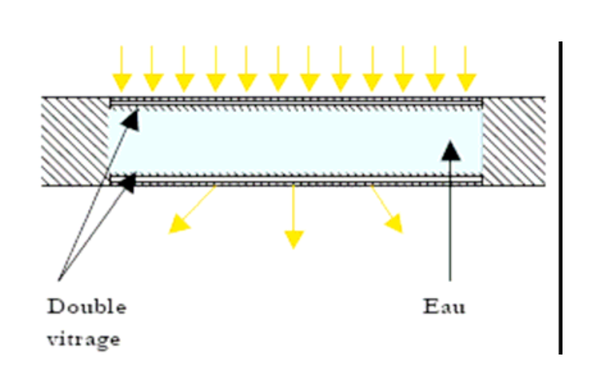
Conformité d'usage : Risque d'occultation de la surface de captage.

D'autres solutions d'intégration dans des éléments de façade sont possibles. L'intégration pourra se faire dans les volets, les brises soleil, les dalles de sol, les auvents, les lucarnes, etc. Mais ces solutions apparaissent comme ayant beaucoup de contraintes en ce qui concerne la surface de captage, la faisabilité (dans le cas des capteurs thermiques), et la mise en œuvre.

4.2 Stockage

4.2.1 Ballon de stockage intégré dans un puits de lumière

Domaine d'emploi : Il concerne les systèmes solaires à circulation d'eau.



Possibilité d'intégration : L'eau chaude est stockée entre deux parois en double vitrage. Attention à la résistance mécanique des parois de verre.

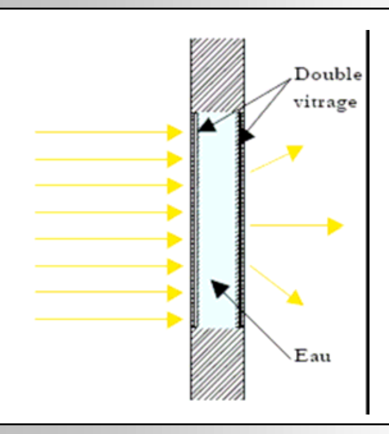
Mise en œuvre : Difficile.
Pose des parois et des étanchéités sur place

Accessibilité : par l'intérieur.

Conformité d'usage : Pertes thermiques importantes. Transparence.

4.2.2 Ballon de stockage intégré dans un mur translucide

Domaine d'emploi : Il concerne les systèmes solaires à circulation d'eau.



Possibilité d'intégration : L'eau chaude est stockée verticalement entre deux parois en double vitrage. Attention à la résistance mécanique des parois de verre. Il est possible dans ce cas de créer une stratification des températures.

Mise en œuvre : Difficile.
Pose des parois et des étanchéités sur place

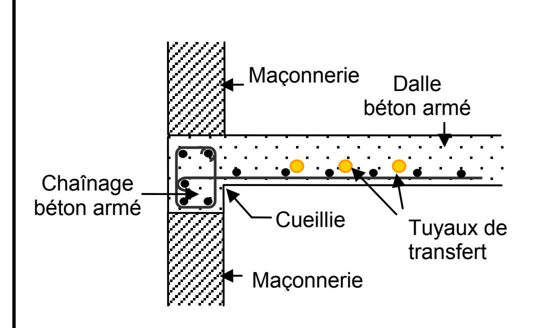
Accessibilité : par l'intérieur.

Conformité d'usage : Pertes thermiques importantes. Transparence.

4.3 Transfert de chaleur

4.3.1 Tuyaux intégrés dans les planchers

Domaine d'emploi : Il concerne les systèmes solaires à circulation d'eau.



Possibilité d'intégration : Les tuyaux de transfert en cuivre sont incorporés dans le plancher au moment de leur construction. Cette solution aide à réduire les pertes thermiques de distributions en se servant de l'inertie du plancher en béton.

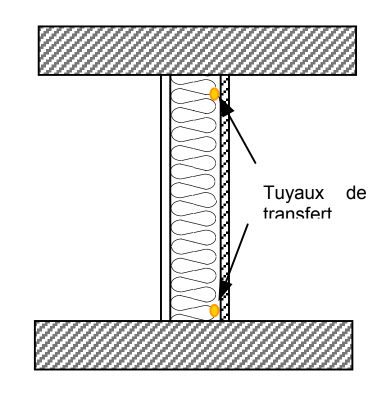
Mise en œuvre : Facile.
Pose des tuyaux sur place en même temps que la construction du plancher.

Accessibilité : Inaccessible.

Conformité d'usage : Tuyaux invisibles.

4.3.2 Tuyaux intégrés dans les cloisons

Domaine d'emploi : Il concerne les systèmes solaires à circulation d'eau.



Possibilité d'intégration : Les tuyaux sont incorporés dans les dans les parties haute et basse des cloisons au moment de la construction de ces derniers.

Mise en œuvre : Facile.
Pose des tuyaux sur place en même temps que la construction de la cloison.

Accessibilité : Inaccessible.

Conformité d'usage : Tuyaux invisibles.

4.4 Conception – Esquisses

A partir de l'analyse précédemment réalisée, six principes constructifs qui semblaient être les plus performants ou les plus abordables ont été choisis. Le développement de ces principes a fait l'objet d'une étude menée avec la collaboration de deux étudiants-architectes [Cheung, 2006].

Pour ce faire, un type constructif est sélectionné dans chaque catégorie constructive :

- Mur en maçonnerie de type III ;
- Bardage acier simple ;
- Façade rideau ;
- Façade à vitrage parclosé ;
- Façade panneau en maçonnerie ;
- Allège de fenêtre dans une façade légère.

À partir de notre conception initiale une réflexion plus aboutie doit être effectuée : une prise en compte du principe constructif seul, l'adaptation du capteur sur l'élément et la bonne insertion du composant dans la globalité de la façade et du bâtiment. Les fonctions (acoustique, thermique, étanchéité) du principe constructif doivent être conservées, ainsi une vérification de celles-ci pour chaque composant est réalisée.

4.4.1 Mur en maçonnerie de type III

Ce type de mur est essentiellement réalisé dans les bâtiments de type habitat individuel, collectif et tertiaire. La paroi extérieure est doublée par une seconde paroi, séparée de la première par une lame d'air à la base de laquelle ont été aménagées les évacuations des eaux d'infiltration.

Notre proposition se résume à la mise en place d'un capteur sur la paroi extérieure qui double la paroi principale. L'accessibilité pour la maintenance se fera par l'extérieur et les collecteurs seront situés dans la lame d'air [Figure 4-1]. Le capteur de type plan pourrait remplacer un bloc de pierre unité, celui-ci étant fixé sur le mur de soutien par une ou plusieurs pattes de fixation. Pour assurer l'étanchéité et l'isolation du capteur, celui-ci serait préfabriqué et réalisé dans un caisson assurant le vide intérieur. L'installation se ferait donc sur le chantier et ne nécessiterait pas de compétences particulières. Il faudrait toutefois réaliser les liaisons du capteur avec les collecteurs et les ballons de stockage.

Une analyse des fonctions initiales du mur sans intégration et des fonctions finales dues à la modification apportée au mur, montre que cet élément ne perdrait pas en performance à laquelle il était destiné initialement, par contre il gagnerait en production énergétique [Tableau 4-1].

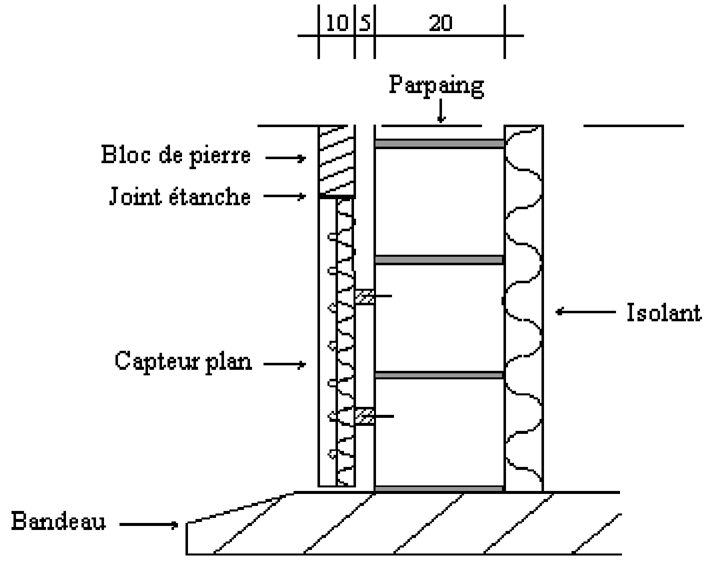


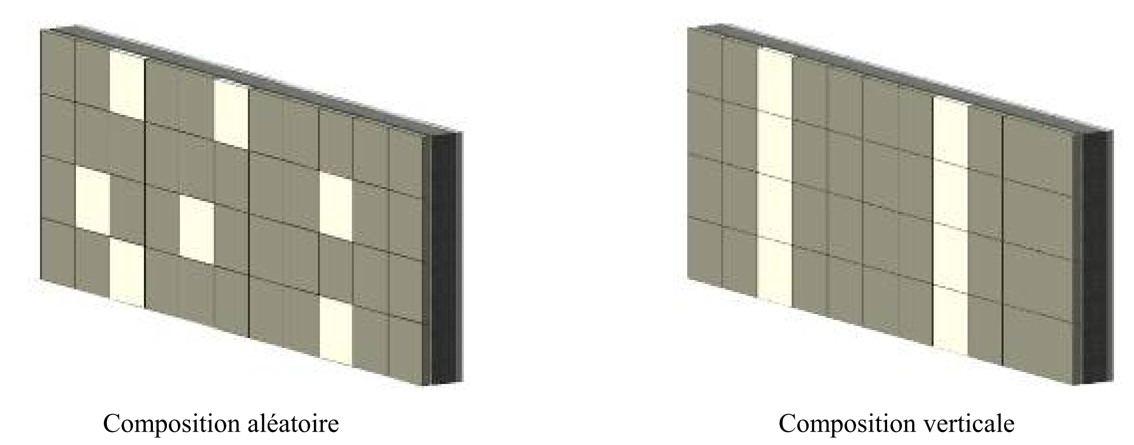
Figure 4-1 : Proposition d'intégration pour le mur maçonnerie de type III.

Fonctions	Initiales (sans intégration)	Finales (avec intégration)
Etanchéité eau	Blocs de pierre	Capteurs et blocs de pierre Joints étanches
Isolation thermique	Laine de roche intérieure	Laine de roche intérieure
Isolation acoustique	Parpaing et laine de roche intérieure	Parpaing et laine de roche intérieure
Isolation vent latéral	Blocs de pierre	Capteurs et blocs de pierre Joints étanches

Tableau 4-1 : Comparaison des fonctions initiales et finales du mur en maçonnerie de type III.

Ainsi les capteurs insérés devraient assurer les fonctions principales d'isolation et d'étanchéité : Un joint étanche devrait être placé entre les capteurs, si placés côte à côte, ou entre les capteurs et les blocs de pierre.

Ce type d'intégration permettrait de créer une multitude de composition architecturale du dessin de la façade [Figure 4-2].



Composition aléatoire	Composition verticale

Figure 4-2 : Exemples d'intégration pour le mur en maçonnerie du type III.

4.4.2 Bardage acier simple

Le bardage simple peau est employé dans la construction des hangars ou des entrepôts qui ne nécessitent aucune isolation thermique ou acoustique. Il peut cependant servir à revêtir un mur maçonné ou une isolation extérieure avec l'interposition d'une lame d'air permettant ainsi d'être utilisé dans les bâtiments de type habitat collectif, tertiaire et usines. Les parois, ou peaux, sont constituées par des profilés en tôles métalliques ayant reçu un revêtement définitif ou par des clins en bois ou en matière plastique. Les joints entre les éléments sont exécutés de manière à éviter les risques d'infiltration et la perméabilité à l'air.
Pour l'intégration, il est possible de fixer un capteur sur les fixations (ossature secondaire) par des pattes de fixation. La mise en place de ce type de capteur serait faite directement sur chantier lors du recouvrement de façade (second œuvre). Ici l'isolant thermique utilisé pour l'isolation du bâtiment serait aussi l'isolant thermique du capteur [Figure 4-3].

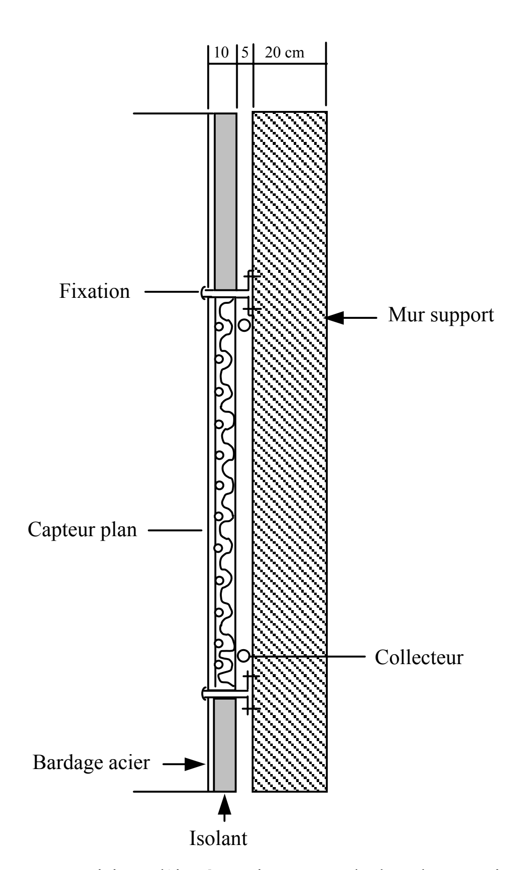


Figure 4-3 : Proposition d'intégration pour le bardage acier simple.

Une analyse des fonctions initiales du bardage acier simple et des fonctions acquises par l'intégration du capteur solaire montre que les fonctions initiales de cet élément seraient toujours respectées. Ainsi l'intégration solaire ne pénaliserait pas le rôle du bardage [Tableau 4-2].

Fonctions	Initiales (sans intégration)	Finales (avec intégration)
Etanchéité eau	Bardage Joint étanche	Capteurs, bardage Joints étanches
Isolation thermique	Laine de roche intérieure	Isolant du capteur (laine de roche)
Isolation acoustique	Laine de roche intérieure Paroi principale (parpaing, béton)	Laine de roche intérieure Paroi principale (parpaing, béton)
Isolation vent latéral	Bardage Joint étanche	Capteurs, bardage Joints étanches

Tableau 4-2 : Comparaison des fonctions initiales et finales du bardage acier simple.

4.4.3 Façade rideau

La façade rideau est principalement utilisée dans l'habitat individuel, collectif et bureaux : tous ses éléments sont mis en place sur le chantier.

Une intégration de capteur solaire est envisageable. L'isolant servirait à la fois d'isolation thermique et acoustique du bâtiment et également d'isolation pour la partie capteur afin de limiter les pertes. L'aspect bardage pourrait être gardé en traçant une trame sur le verre soit en sérigraphie soit en gravure (rainure par exemple). Ainsi l'aspect architectural de l'élément serait respecté [Figure 4-4].

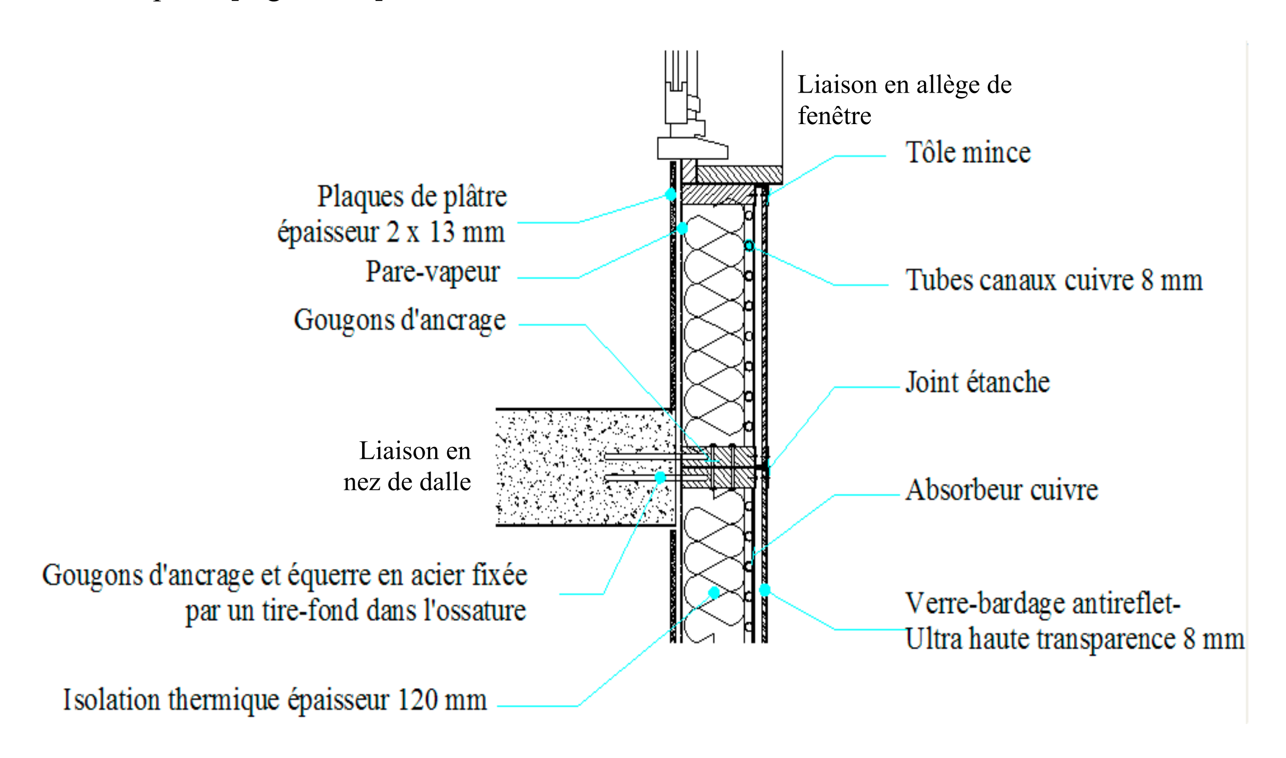


Figure 4-4 : Proposition d'intégration dans la façade rideau.

Le panneau capteur est un élément non porteur qui vient s'insérer dans une composition de plusieurs panneaux, ainsi il peut être interchangeable par un autre panneau capteur s'il y a un disfonctionnement ou alors par un panneau maçonnerie, acier ou bois pour des besoins

architecturaux. Il peut éventuellement être accessible de l'intérieur pour la maintenance. Cependant des joints étanches et des tôles viennent assurer l'isolation et l'étanchéité de la façade. La mise en œuvre sur chantier pouvant être difficile, deux solutions pourraient être envisagées :

- Mise en place complète sur chantier : Les éléments du capteur pourraient se poser les uns après les autres, le composant serait fabriqué sur place ;
- Utilisation d'éléments préfabriqués : le vitrage, l'absorbeur et l'isolant pourraient être inséré dans un coffre en aluminium par exemple sur lequel viendrait s'ajouter le revêtement intérieur (pare vapeur et plaque de plâtre).

Une analyse des fonctions initiales du mur sans intégration et des fonctions finales dues à la modification apportée à la façade, montrent que l'intégration n'altérerait pas les fonctions initiales de la façade [Tableau 4-3].

Fonctions	Initiales (sans intégration)	Finales (avec intégration)
Etanchéité eau	Pare pluie	Capteur Joints étanches
Isolation thermique	Isolant 12cm	Capteur (isolation intérieure) Joints étanches
Isolation acoustique	Isolant	Isolant du capteur

Tableau 4-3 : Comparaison des fonctions initiales et finales de la façade rideau.

Les réseaux de distribution pourraient être insérés dans les menuiseries en partie haute (circulation d'eau chaude) et basse (circulation d'eau froide). Chaque panneau composant la façade rideau serait relié aux menuiseries supérieure et inférieure.

Une variante serait possible avec des menuiseries verticales. Les panneaux seraient alors reliés entre eux et le fluide caloporteur circule d'un capteur à l'autre [Figure 4-5].

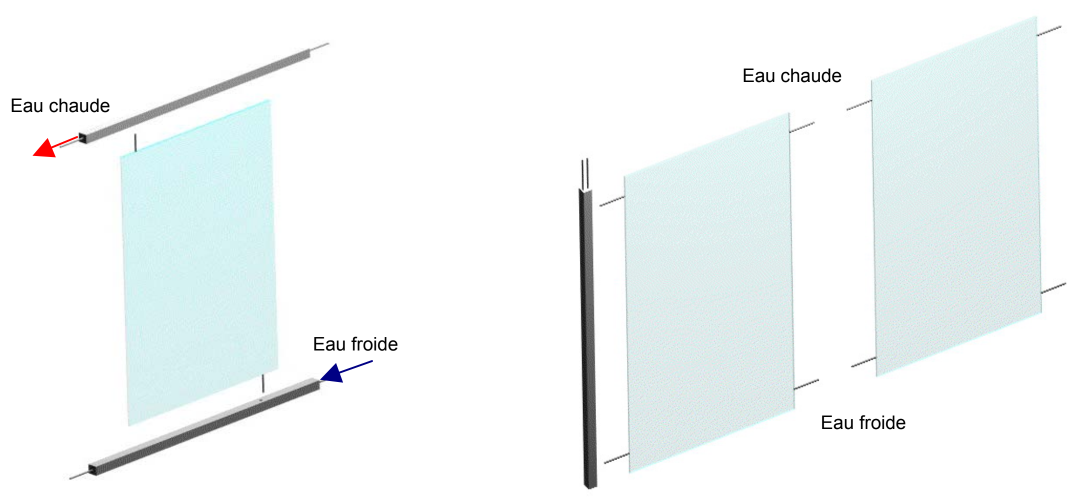


Figure 4-5 : Exemple de réseau de distribution dans la menuiserie.

4.4.4 Allège de fenêtre dans une façade légère

Ce type d'allège est essentiellement réalisé dans les bâtiments de type habitat collectif, tertiaire et usine. Ce système constructif est réalisé dans les façades légères de type rideau où l'allège vient recouvrir le nez de la dalle. L'allège de la fenêtre permet ainsi d'insérer des équipements et des réseaux en façade.

Un capteur solaire pourrait être inséré en allège d'une façade légère de type rideau, celui-ci se plaçant devant le nez de la dalle et entre le châssis des ouvertures des étages situés les uns aux dessus des autres. L'ossature secondaire (montant et traverse) maintiendrait le panneau préfabriqué constitué du capteur et d'une partie basse qui recouvre le nez de la dalle. Cette solution permettrait d'avoir un plan incliné pour une meilleure orientation au rayonnement solaire, d'être accessible depuis l'intérieur du bâtiment en démontant l'habillage intérieur, d'obtenir l'espace nécessaire pour placer les différents flux et réseaux nécessaires au bon fonctionnement du bâtiment et du capteur, et d'avoir un capteur qui serait un élément préfabriqué. Les capteurs thermiques pouvant être utilisé dans cette solution seraient les capteurs plans à air pour préchauffer l'air de ventilation ou les capteurs plans vitrés à circulation d'eau pour les systèmes à eau chaude sanitaire [Figure 4-6].

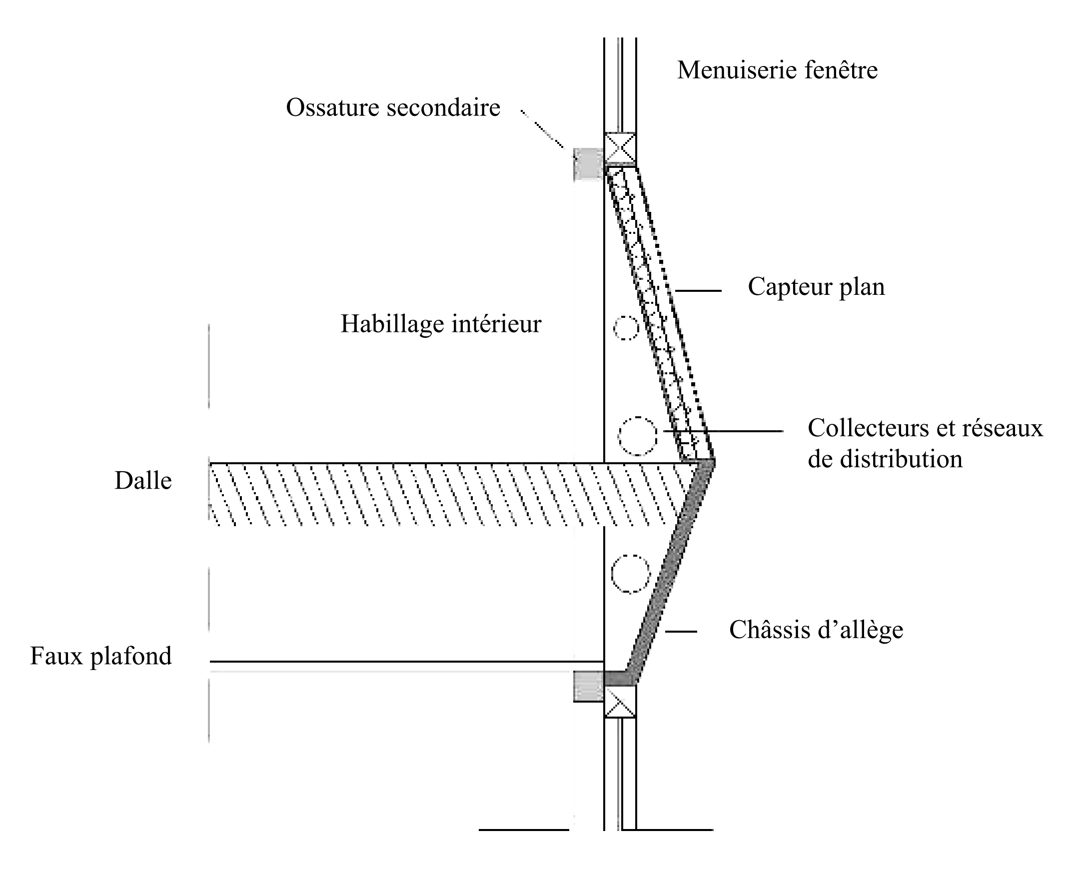


Figure 4-6 : Détail de la proposition d'intégration dans l'allège de fenêtre.

Une comparaison entre les fonctions initiales assurées par l'allège avant et après l'insertion de capteurs montre que l'intégration n'affecterait pas négativement les fonctions principales de l'allège [Tableau 4-4].

Fonctions	Initial	Avec le capteur
Etanchéité eau	Allège préfabriquée	Capteur solaire Joint étanche
Isolation thermique	Laine de roche intérieure	Isolant du capteur (laine de roche)
Isolation acoustique	Allège préfabriquée Laine de roche intérieure	Capteur solaire (isolation intérieure) Joint étanche
Isolation vent latéral	Allège préfabriquée	Capteur solaire Joint étanche

Tableau 4-4 : Comparaison des fonctions initiales et finales de l'allège de fenêtre.

Pour composer la façade les blocs capteurs viennent se placer linéairement les uns contre les autres [Figure 4-7]. Si les capteurs (les boîtes) sont théoriquement étanches avec une isolation propre (laine de roche interne), il faut cependant que les éléments entre eux assurent l'étanchéité et l'isolement nécessaire. Ainsi un joint étanche doit être inséré entre les éléments.

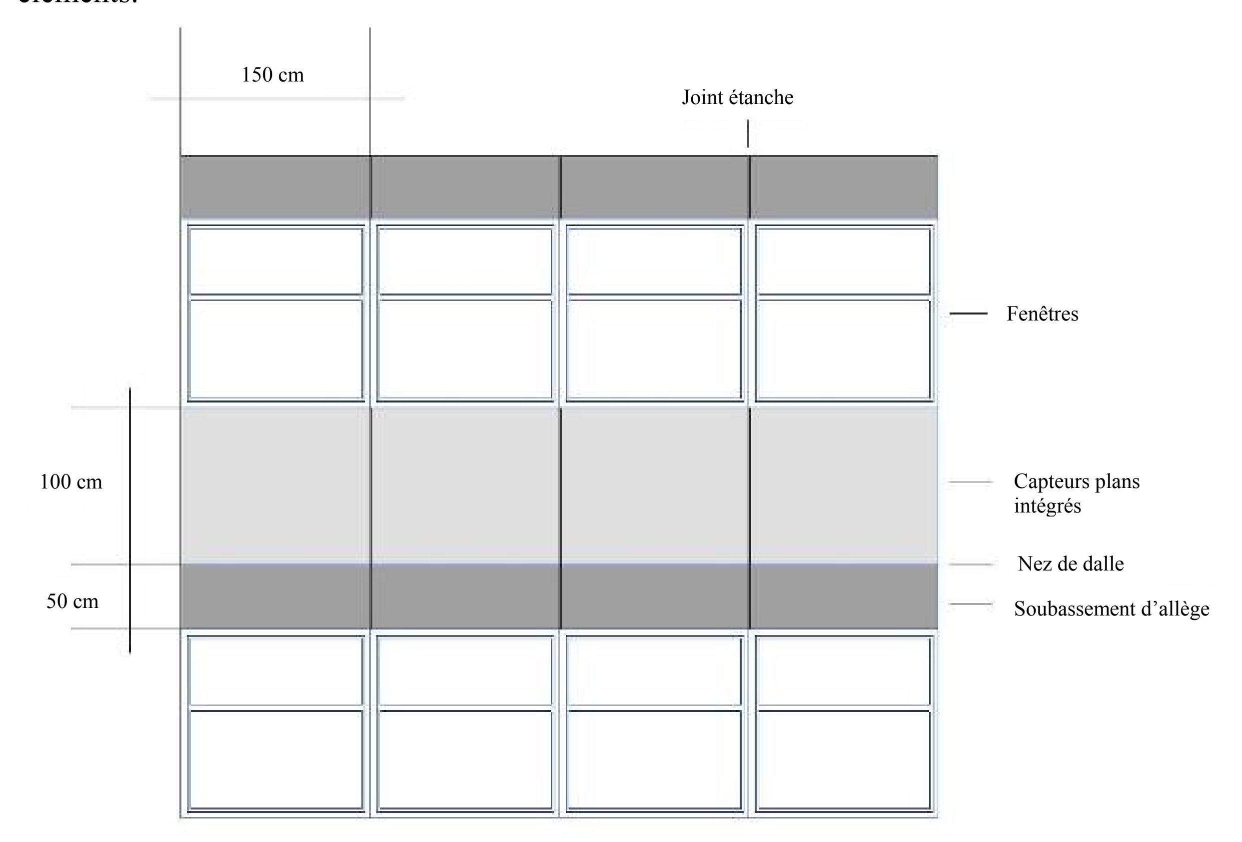


Figure 4-7 : Exemple d'intégration de capteurs solaires dans l'allège.

4.4.5 Façade panneau en maçonnerie

Ce type de façade est principalement utilisé dans l'habitat individuel, collectif et bureaux. Dans la mise en œuvre, tous les éléments sont mis en place sur le chantier.

Une intégration de capteur solaire dans la façade serait envisageable. L'isolant servirait d'isolation thermique et acoustique du bâtiment et également d'isolation pour la partie capteur afin de limiter les pertes. L'aspect esthétique du panneau pourrait être gardé en traçant une trame sur le verre soit en sérigraphie soit en gravure (rainure par exemple) [Figure 4-8].

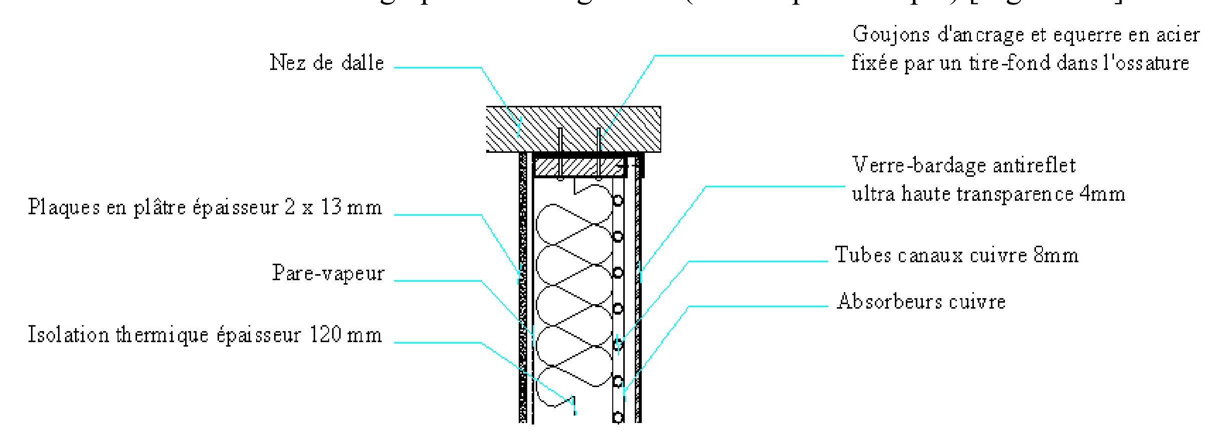


Figure 4-8 : Détail de la proposition d'intégration dans la façade panneau.

La mise en œuvre sur chantier pourrait être difficile, ainsi les solutions qui pourraient être envisagées seraient la mise en place complète sur chantier des éléments solaires en les posant les uns après les autres, ou d'utiliser des panneaux préfabriqués en usine sur lesquels viendrait s'ajouter le revêtement intérieur (pare vapeur et plaque de plâtre).

Une analyse des fonctions initiales de la façade et des fonctions acquises par l'intégration du capteur solaire montre que les fonctions initiales de cet élément seraient toujours respectées. Ainsi l'intégration solaire ne pénaliserait pas le rôle de la façade panneau [Tableau 4-5].

Fonctions	Initial	Avec le capteur
Etanchéité eau	Pare pluie	Capteurs Joints étanches
Isolation thermique	Isolant 12cm	Capteurs (isolation intérieure) Joints étanches
Isolation acoustique	Isolant. Etude acoustique nécessaire.	Isolant. Etude acoustique nécessaire.

Tableau 4-5 : Comparaison des fonctions initiales et finales de la façade panneau.

L'élément capteur de la façade panneau en maçonnerie pourrait être préfabriqué et interchangeable avec les panneaux qui composent la façade. Il serait également accessible depuis l'intérieur pour permettre la maintenance. Entre les panneaux, des joints étanches et des tôles d'acier viendraient assurer l'étanchéité de la façade à l'eau et l'humidité. Le réseau de distribution serait le même que celui utilisé dans la façade rideau.

4.4.6 Façade à vitrage parclosé

La façade à vitrage parclosé est principalement utilisée dans l'habitat collectif, bureaux et industriel. Tous les éléments sont assemblés sur le chantier.

L'intégration de capteurs solaires thermiques dans le vitrage est envisageable. Le double vitrage actuel pourrait être remplacé par un élément capteur. La largeur devrait être augmentée afin d'accueillir les éléments de captage : l'absorbeur, l'isolation et les collecteurs. La seule modification concerne la transparence de la façade [Figure 4-9].

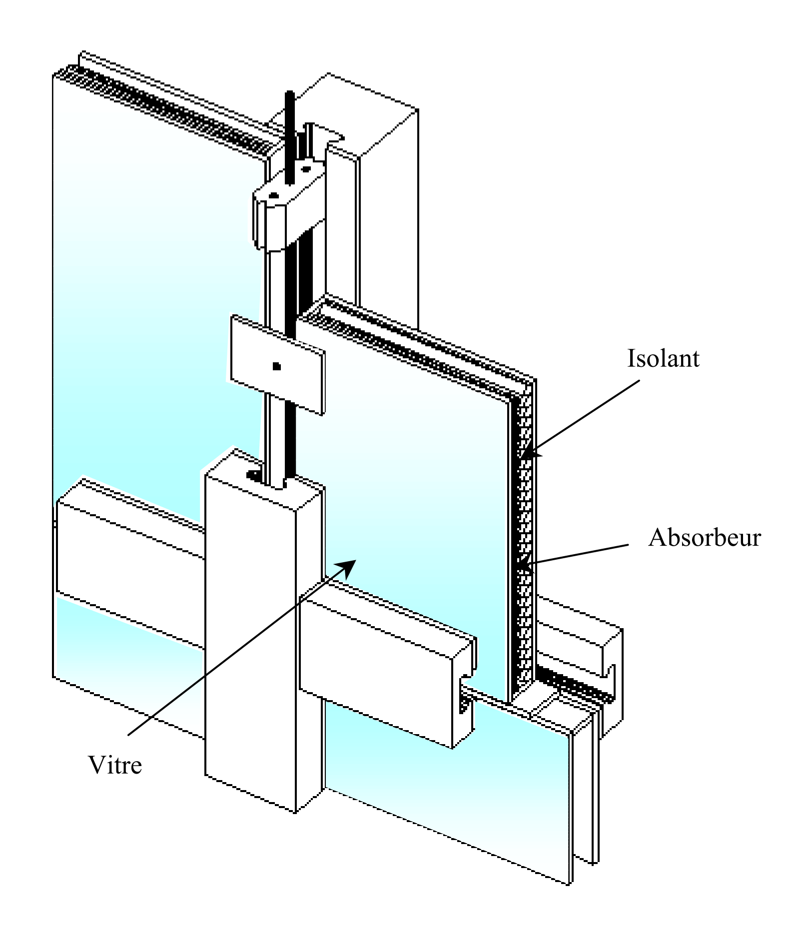


Figure 4-9 : Détail de la proposition d'intégration dans la façade à vitrage parclosé.

La mise en œuvre sur chantier serait simple, l'élément pourrait être préfabriqué. Etant accessible depuis l'intérieur, la maintenance serait aisée. Cependant l'étanchéité entre les différents panneaux doit être assurée par les capots de la menuiserie, ainsi que par les joints étanches entre la menuiserie et le capteur [Tableau 4-6].

Fonctions	Initial	Avec le capteur
Etanchéité eau	Pare pluie	Capteurs Joints étanches
Isolation thermique	Isolant 12cm	Capteurs (isolation intérieure) Joints étanches
Isolation acoustique	Isolant. Etude acoustique nécessaire.	Isolant. Etude acoustique nécessaire.

Tableau 4-6 : Comparaison des fonctions initiales et finales de la façade à vitrage parclosé.

L'élément capteur, inséré dans la menuiserie de la façade, permettrait à l'architecte de créer plusieurs compositions architecturales.

4.5 Conclusion

L'analyse faite nous a permis d'étudier des possibilités d'intégration des composants solaires dans le bâtiment. Six solutions ont été choisies et une analyse de faisabilité suivie d'une étude fonctionnelle de l'élément, avant et après l'intégration, ont été menées afin de détailler la mise en œuvre de ces conceptions et l'impact que pourrait avoir l'intégration sur les fonctions principales de l'élément d'origine.

Les points sur lesquels nous nous sommes basés dans l'élaboration des propositions sont importants mais pas suffisants, et ces conceptions ne sont que préliminaires. En effet, dans une démarche de développement durable, nous aurons besoin d'évaluer la conception avec une étude du cycle de vie.

Ainsi, la concrétisation de chacune de ces conceptions nécessitera une analyse prospective afin d'étudier l'intérêt économique, l'harmonie architecturale, la performance énergétique et son impact environnemental, ce qui mènera le concepteur dans le chemin sûr d'une perspective gagnante sur les plans d'industrialisation et de la diffusion sur le marché.

Pour atteindre nos objectifs, nous aurons besoin d'une méthode ou d'un outil prospectif qui aura comme objectif d'évaluer des conceptions d'intégration solaire, de guider les concepteurs dans leur démarche et de leur donner les pistes d'amélioration de leurs idées. Le développement d'une telle méthode fait l'objet de la partie suivante.

Chapitre 5 :
Élaboration d’un outil d’analyse et d’aide à la décision

5 Élaboration d'un outil d'analyse et d'aide à la décision

Dans les chapitres précédents, nous avons analysé les principes fonctionnels des systèmes solaires thermiques actifs et ceux des procédés et des éléments de construction. Cette analyse permet d'exposer et de repérer les éléments et les procédés susceptibles d'intégrer ou d'être remplacés par des éléments solaires, et d'aménager un terrain technique aux concepteurs pour pouvoir concevoir des solutions qui permettront au solaire de s'intégrer mieux dans l'enveloppe ou encore la structure du bâtiment. Mais il reste à préparer et à provoquer la décision et le choix d'une solution d'intégration ou d'un procédé constructif. Plusieurs questions restent à résoudre :

- Comment mettre en œuvre une proposition d'intégration solaire ?
- Dans quel environnement peut-elle évoluer et quelles sont les variables essentielles à son évolution ?
- Quels sont les principaux acteurs agissant sur ces variables ?

Ainsi, la mise en œuvre d'une solution d'intégration solaire s'apparente à un acte de prospective qui intègre un certain nombre d'éléments, passés ou à venir [Jouvenel H., 1993]. Nous devons donc disposer d'une méthode qui puisse conduire un débat transparent sur les choix et les décisions du présent qui conduiront vers notre objectif souhaité du futur. Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour engager une telle démarche mais celle-ci ne peut être entreprise qu'avec une réflexion structurée [Hatem F., 1993]

Cette partie a pour but de développer, pour les concepteurs des projets de construction du bâtiment, un outil d'aide à la conception et d'analyse des propositions d'intégration technique et architecturale des composants solaires dans le bâtiment. Cet outil nous permettra également de guider l'optimisation de la conception des procédés constructifs et des composants solaires. Dans une première étape nous rappelons les principes généraux d'une démarche prospective. Nous présenterons ensuite les principaux enjeux de l'intégration solaire. Le travail consistera ensuite à élaborer une grille d'analyse en se reposant sur une analyse multicritère et sur le cycle de vie du produit, permettant d'une part d'évaluer et hiérarchiser, notamment en termes de faisabilité architecturale et technique, toute solution d'intégration de système solaire thermique actif et d'autre part, de mettre en évidence les principaux facteurs d'évolution de ces solutions. Cette méthode sera enfin appliquée à diverses propositions d'intégration préalablement formulées, de telle sorte que pourront se dégager non seulement une comparaison des différentes propositions, mais aussi quelque perspective d'évolution (techniques constructives, matériaux…) de ces propositions.

5.1 La démarche prospective

D'après le Grand Dictionnaire Terminologique, le mot « prospective » est défini comme une attitude d'esprit proposée par Gaston Berger, en égard aux changements rapides en cours dans

le monde moderne et s'adressant aux personnes ayant à prendre des décisions importantes dans la société ou dans les entreprises.

La méthode préconisée par l'auteur part des considérations suivantes : les changements doivent être considérés à intervalles plus lointains que le futur immédiat ainsi que dans leurs interrelations avec les autres domaines en transformation; leurs conséquences ne peuvent jamais faire perdre de vue leur influence sur l'homme. La prospective ne vise pas à tracer des plans précis mais à analyser les tendances en profondeur de manière à conduire vers des directions générales d'action.

La prospective possède trois caractéristiques essentielles qui, pour une large part, la différencient de la prévision [Jouvenel 1993]:

- C'est une démarche pluridisciplinaire, d'inspiration systémique : Un problème ne pourra pas être correctement appréhendé lorsqu'on le découpe en rondelles comme on nous a généralement enseigné à le faire en disciplines académiques distinctes. La prospective se propose d'appréhender les réalités au travers de l'ensemble de leurs aspects, de toutes leurs variables, quelle que soit leur nature. En partant d'une approche systémique du problème, elle nous invite à considérer les phénomènes à partir d'une étude de l'ensemble des facteurs et de leurs interrelations ;
- C'est une démarche qui intègre la dimension du temps long, passé et à venir : Dans tout système coexistent des variables empreintes d'une grande inertie (par exemple la disponibilité des matériaux), avec d'autres dont les variations interviennent sur des échelles de temps de plus en plus courtes (par exemple l'innovation technologique). Seule l'analyse sur une longue période permet d'éliminer les « effets de période » et d'appréhender la dynamique profonde des systèmes et d'analyser les ressorts profonds de l'évolution. En effet, sur le moyen et le long terme, on récupère suffisamment de liberté de manœuvre pour engager de réelles transformations.
- C'est une démarche qui intègre les ruptures : Au lieu de postuler la permanence du changement (demain différera d'aujourd'hui exactement comme aujourd'hui diffère d'hier), elle s'efforce de tenir compte des phénomènes de discontinuité et de rupture, subies ou voulues, résultant de facteurs aussi divers que les effets de seuil (par exemple, saturation d'un marché), l'irruption d'innovations de toutes natures et d'acteurs " briseurs d'habitudes ", et la volonté humaine de modifier les règles du jeu.

5.2 Élaboration d'une grille d'analyse

La première étape du développement de notre méthode prospective a consisté à identifier et à organiser les entrées et les sorties de la méthode. Ainsi, nous avons commencé dans un premier temps par fixer le référentiel d'analyse pour le choix de critères définissant la qualité de l'intégration solaire dans le bâtiment. Dans un second temps nous avons continué par le recensement et la définition des variables d'analyse. De ce travail a résulté la grille d'analyse qui constitue le premier élément de la méthode.

5.2.1 Les types des critères de l'analyse

Le choix des critères définissant la qualité d'intégration est basé sur l'analyse de la problématique de l'intégration effectuée dans la première partie de ce rapport. Ainsi, nous pouvons définir quatre types de critères :

5.2.1.1 Les critères techniques

La notion de technique se rapporte aux procédés utilisés pour la réalisation d'une activité particulière, au savoir-faire requis pour la maîtrise d'une tâche, d'une activité.
Afin d'être compétitifs par rapport aux autres systèmes thermiques (à l'instar du chauffage au fioul ou à l'électricité), les systèmes solaires thermiques se doivent de présenter une bonne productivité : la production de chaleur est en effet la fonction principale de ces systèmes solaires. La chaleur (qu'elle soit celle de l'eau chaude sanitaire ou de l'air ambiant) doit être disponible à l'usager, et ce, à tout instant, malgré l'inconstance du rayonnement solaire.
D'autre part, il est préférable que les systèmes solaires thermiques présentent une technicité simple, de telle sorte que la fabrication, l'installation, l'exploitation, la maintenance et la déconstruction soient aussi aisées que possible. Les interventions de maintenance seront alors minimisées, et le confort des usagers n'en sera que plus grand.

5.2.1.2 Les critères économiques

Si l'énergie solaire est gratuite et quasi-illimitée, le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé, d'où un manque de compétitivité du solaire par rapport aux autres énergies, et ce, malgré les aides financières proposées par l'état (il faut savoir que le temps de retour sur investissement est généralement de l'ordre de 20 ans). Ce coût trop élevé, en sus de l'esthétique et de la difficulté d'intégration architecturale des systèmes, constitue une véritable entrave à la demande, si bien que les fabricants sont aujourd'hui dans l'impossibilité d'engager les efforts nécessaires au développement de gains de productivité ou d'innovations technologiques.

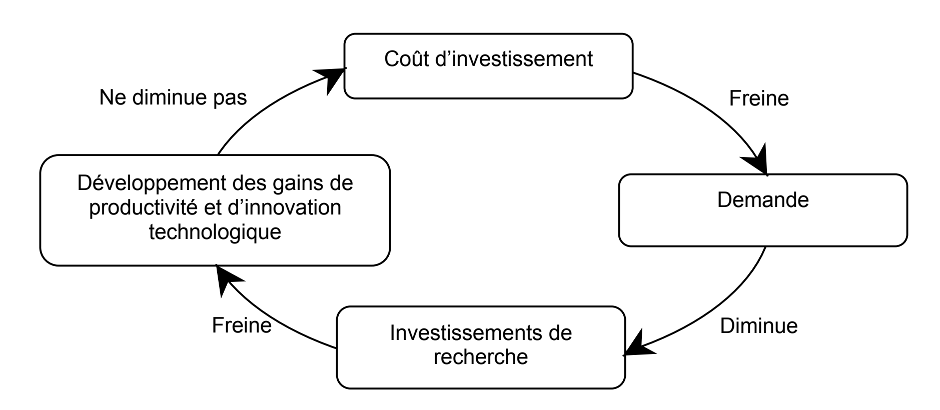


Figure 5-1 : Effet boule de neige freinant l'exploitation de l'énergie solaire thermique.

Il s'ensuit que les systèmes proposés présentent un coût d'investissement toujours élevé et ne répondent toujours pas à la demande, en termes d'esthétique et d'intégration architecturale ; d'où l'effet boule de neige qui freine aujourd'hui l'exploitation de l'énergie solaire thermique [Figure 5-1].

5.2.1.3 Les critères environnementaux

La démarche de gestion des projets constructifs visant à obtenir une Haute Qualité Environnementale (HQE) conduit à élargir le champ de recherche des solutions les plus performantes, en considérant tous les stades de vie et tous les impacts du bâtiment. Ces impacts concernent évidemment les aspects énergétiques (consommations et émissions associées), mais également la consommation de matières premières, les impacts sanitaires (sur les professionnels et usagers des bâtiments), la prise en compte des conforts d'usage (thermique, acoustique, olfactif, lumineux…), la gestion des différents types de déchets, l'action sur le comportement des usagers.

5.2.1.4 Les critères architecturaux

Il est primordial que le système solaire soit accepté non seulement par les différents utilisateurs, mais aussi par l'architecte. Celui-ci se positionne en tant que maître d'œuvre de l'acte de construire, et « homme de l'art ». C'est à lui que revient la conception, pour le compte des tiers, des édifices et bâtiments de toute nature ou de leur transformation, tant sur le plan technique que fonctionnel et esthétique, puis la direction de tous les travaux nécessaires à leur réalisation. Il s'ensuit qu'un système solaire sera d'autant plus intéressant aux yeux de l'architecte qu'il est modulable et qu'il permet de satisfaire une volonté conceptuelle de l'architecte. La qualité créative de ce dernier n'en sera que plus légitime.

5.2.2 Nécessité d'une structure hiérarchique

Les critères d'évaluation pertinents pour l'objet de notre étude sont potentiellement nombreux et variés. Si nous voulons que l'information fournie par la méthode soit maîtrisable, exploitable et lisible, il est indispensable de la structurer, de l'organiser. De ce fait, afin d'obtenir une évaluation de sortie synthétique et lisible, sans avoir à réduire le nombre de critères et perdre en précision, nous avons pris le choix de structurer hiérarchiquement les critères.

Il est à noter que, même si les impacts durant la vie en œuvre sont prépondérants, chacune des étapes de vie d'un produit du bâtiment se trouve avoir des impacts non négligeables, tant au niveau économique qu'environnemental, technique et même architectural. C'est pourquoi il s'avère intéressant d'étudier chacune des propositions d'intégration, depuis leur fabrication, en prenant en compte leurs composants et donc en remontant aux ressources puisées dans l'environnement, jusqu'à leur fin de vie, y compris le traitement des déchets ultimes créés, en

passant par toutes les étapes de leur utilisation. Une approche par analyse de cycle de vie semble donc tout à fait judicieuse.
Pour chaque étape de vie, les critères explorés à partir de la nature du critère (économique, architecturale, technique ou environnemental) sont regroupés en des sur-critères suivant le schéma suivant [Figure 5-2] :

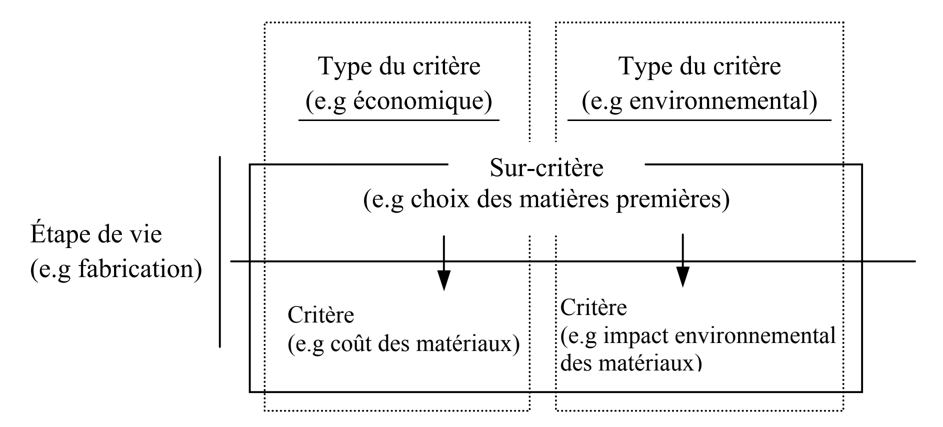


Figure 5-2 : La structure hiérarchique de la grille d'analyse de l'intégration.

Le résultat d'évaluation selon un sur-critère est le résultat agrégé du niveau précédent d'évaluation. Les agrégations induites par cette approche présentent certaines limites qui seront discutées et traitées dans la suite.

5.2.3 L'identification et la définition des critères d'analyse

Le choix des critères définissant la qualité d'intégration est basé, comme on vient de le préciser, sur les différentes étapes de vie de l'élément solaire de construction.

5.2.3.1 Critères de la fabrication

Il s'agit de la phase opérationnelle de création de l'ouvrage. La fabrication d'un ouvrage correspond à l'ensemble des transformations, industrielles ou non, de matières premières en cet ouvrage, utilisable et destiné à la consommation. On observera donc plus particulièrement, dans la phase de fabrication, les deux sur-critères : le choix des matières premières et le procédé constructif.

Choix des matières premières

Le choix des matériaux à utiliser dans la construction de l'élément solaire correspond à l'adoption par préférence et à la sélection des matériaux qui constitueront l'ouvrage à fabriquer.
Il va sans dire que le choix des matériaux doit être fonction de critères économiques et techniques. En effet, il est nécessaire que les matériaux choisis soient non seulement disponibles, mais également, dans la mesure du possible, peu coûteux, à faible impact environnemental, et, d'un point de vue purement technique, performants.

- La « **disponibilité des matériaux** » est la qualité propension des matériaux à être rapidement utilisés. Elle dépend non seulement des ressources naturelles en matières premières, à la base des matériaux, mais aussi du marché économique.
- La « **performance des matériaux** » est l'ensemble des indications chiffrées caractérisant les possibilités optimales de ces matériaux. La performance à atteindre différera selon que le système est destiné à capter, absorber, transférer, stocker ou distribuer. Les matériaux pourront ainsi être évalués selon leur pouvoir de réflexion, d'absorption, de transfert, de conductivité thermique, de stockage ou encore de changement de phase.
- Le « **coût des matériaux** » comprend le coût (en termes de main d'œuvre, d'énergie et d'outils utilisés) d'extraction des matières premières et de leurs différentes transformations jusqu'à obtenir les matériaux. Il peut varier en fonction de la disponibilité en matières premières et de l'offre et la demande.
- L'« **impact environnemental des matériaux** » utilisés dans la fabrication devrait être faible, en termes notamment de pollution et de toxicité. Il faut savoir que les entreprises de construction n'ont qu'une maîtrise partielle voire nulle, de la nature et de la quantité des déchets générés par les travaux qu'elles exécutent. La nature des matériaux mis en œuvre (et de leurs résidus) est en effet en grande partie déterminée par le choix de l'auteur de projet et les fabricants de matériaux, si bien que la problématique des déchets se doit d'être prise en compte dès les stades de conception et de fabrication. Il s'ensuit que les matières premières doivent répondre à des critères environnementaux, d'où la préférence pour des matériaux biodégradables.

<u>Procédé constructif</u>

Le procédé constructif correspond au moyen, à la suite d'opérations mises en œuvre pour la fabrication de l'ouvrage. On s'intéressera non seulement à la méthode de fabrication, en termes notamment de faisabilité technique et de possibilité d'industrialisation, mais aussi aux impacts économiques, à savoir le coût de fabrication, et environnementaux du procédé.

- La « **faisabilité technique** » d'un ouvrage est l'ensemble des qualités techniques qui rendent réalisable et aisée la construction de l'ouvrage. Elle est directement fonction des normes que l'ouvrage devrait respecter et de la délicatesse demandée pour la fabrication du système et des différentes. Toute réalisation d'espaces sous vide, de zones d'étanchéité, de reprises de charges (…) demandera en effet une attention particulière lors de l'étape de la fabrication. Il est d'autre part à souligner que la faisabilité technique est également fonction de l'avancement technique : des progrès techniques pourront permettre demain la réalisation d'une tâche aujourd'hui difficile voire impossible.
- La « **possibilité d'industrialisation** » d'un système est dépendante non seulement du système lui-même, mais aussi du contexte économique. L'industrialisation d'un

ouvrage est le processus complexe qui permettrait d'appliquer au secteur des systèmes solaires actifs, des techniques et des procédés industriels qui apporteraient rationalisation et hausse de productivité de cet ouvrage. En effet, un système pourra d'autant plus s'industrialiser s'il est standard, produit en grande quantité.

- Le « **coût de la fabrication** » inclut les coûts de la main d'œuvre, de l'énergie et des outils nécessaires à la réalisation des différentes transformations de fabrication.
- L' « **impact environnemental de la fabrication**» est évalué en termes de création de déchets, de pollution et de toxicité engendrées par les différentes transformations.

5.2.3.2 Critères de la mise en œuvre

Menée par les entreprises et la maîtrise d'œuvre, en relation avec la maîtrise d'ouvrage, elle consiste en la préparation sur le chantier et la mise en place définitive des matériaux nécessaires à la réalisation d'un projet. On distinguera donc, dans la phase de mise en œuvre, les trois sur-critères suivants : le procédé d'installation, l'adaptabilité et l'esthétique de l'élément solaire intégré.

Procédé d'installation

Le procédé d'installation d'un ouvrage se réfère à la suite d'opérations exécutées pour la mise en œuvre de cet ouvrage. À l'instar du procédé constructif, le procédé d'installation sera évalué par ses impacts économiques et environnementaux, ainsi que par un critère de faisabilité.

- Le « **coût de l'installation** » inclut les coûts de la main d'œuvre, de l'énergie et des outils nécessaires à la réalisation des différentes opérations d'installation.
- La « **facilité d'installation** » sera évaluée en termes de temps d'installation et de technicité requise. L'installation d'un système sera plus rapide et plus aisée si ce système est modulaire, c'est à dire constitué d'un ensemble de modules préfabriqués à assembler.
- L' « **impact environnemental de l'installation**» est aussi évalué en termes de création de déchets, de pollution et de toxicité, engendrées par les différentes transformations.

Adaptabilité

L'adaptabilité d'un système solaire thermique à son environnement correspond à la mise en accord, l'appropriation du système solaire par son environnement, considéré comme prépondérant ou du moins incontestablement réel. Cette mise en accord permet d'obtenir un ensemble fonctionnel, cohérent et harmonieux.

- L'« **optimisation du positionnement** » en fonction de la situation météorologique du site, quand l'application concerne la fonction de captage, est évaluée non seulement en termes d'inclinaison et d'orientation des surfaces de captage de l'élément solaire, mais

aussi en termes de gêne due aux masques. Dans les fonctions de distribution et de stockage, ce critère est évalué par le lieu d'installation de l'élément (stockage et distribution à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment, en haut ou en bas pour des systèmes en thermosiphon).

- L'« **adéquation en termes d'espace** » correspond à l'adéquation entre l'espace offert par le bâti et l'espace nécessaire à l'ouvrage et aux besoins. Ces espaces peuvent être des surfaces (dans le cas par exemple de capteurs) ou des volumes (dans le cas d'un ballon de stockage). On entendra également par « adéquation en termes d'espace » les possibilités d'extension et d'évolution spatiale de l'ouvrage.
- L'« **adéquation en termes d'usage** » caractérise le choix approprié de la configuration du système pour l'usage voulu. C'est ainsi que les capteurs de type "moquette", qui sont moins efficaces que les capteurs sous vide dans le chauffage de l'eau à des hautes températures, sont préconisés pour le chauffage des piscines.
- La « **possibilité d'installation en réhabilitation** » est évaluée selon l'impact de l'installation sur le gros œuvre du bâtiment existant. Seront en effet à éviter les installations nécessitant la déconstruction d'une partie considérable du gros œuvre (à l'instar de la déconstruction d'un plancher ou d'une façade) pour une reconstruction nouvelle.
- L'« **adéquation en termes de poids** » correspond à la surcharge qui pourrait provenir de l'ajout d'un élément solaire et de ses composants (pour le captage : vitres, absorbeurs et structures additionnels, pour le stockage : le poids du fluide stocké, etc.)

Esthétique

L'esthétique est une recherche de ce qu'est le beau et de ce qui est beau. L'expression « esthétique des systèmes solaires » se réfèrera donc à la recherche sur les formes, la matière, les couleurs, visant à rendre ces systèmes solaires les plus attrayants possibles, et ce, tant pour les utilisateurs que pour la maîtrise d'œuvre. Nous distinguons donc trois critères principaux : la visibilité du système, sa modulation ainsi que son acceptation.

- La **« visibilité du système solaire»** correspond à la qualité de ce système à être vu, facilement perceptible. La visibilité est à la base même de la problématique d'intégration des systèmes solaires. Un système invisible, même non intégré au bâti (comme par exemple des capteurs simplement posés sur une toiture terrasse), ne sera en effet pas sujet à polémique, si bien qu'il sera, en partie, accepté.
- La « **modulation du système solaire** » n'est autre que sa capacité de variation, d'adaptation, de modification selon certains critères ou certaines circonstances. Elle peut être recherchée dans le coloris, le modelé, les formes, les matériaux, etc. Ainsi, la modulation est un critère essentiel pour la maîtrise d'œuvre.
- L' « **acceptation des usagers** » correspond au fait que les usagers consentent à faire installer et à utiliser le système solaire. L'acceptation est le résultat d'une combinaison

de nombreuses variables relatives au contexte économique, environnemental et socioculturel. Les propositions ne seront donc évaluées que de manière grossière, au vu de l'impact de l'installation sur le bâtiment, sur le comportement des usagers et sur leur sensibilité.

5.2.3.3 Critères de la vie en œuvre

La vie en œuvre n'est autre que la phase d'utilisation de l'ouvrage. Elle concerne particulièrement les usagers et le maître de l'ouvrage, mais peut faire appel au maître d'œuvre (en cas de garantie de l'ouvrage, par exemple) et à des entreprises extérieures.
Pour l'évaluation des critères de cette étape de vie, nous pouvons distinguer, la maintenance de l'exploitation, en signalant toutefois que toute défaillance au niveau d'actions à entreprendre au titre de l'exploitation entraîne systématiquement des conséquences sur la maintenance de l'ouvrage, c'est pourquoi exploitation et maintenance sont interdépendantes.

L'exploitation d'un ouvrage correspond à l'action permettant directement à l'ouvrage d'assurer un service déterminé. Si bien que l'exploitation d'un produit se trouve être directement dépendante de la (ou les) fonction(s) assujettie(s) à ce produit. On veillera donc à évaluer les systèmes selon la (ou les) fonction(s) qu'ils assurent, d'où la distinction entre les fonctions thermiques (sur-critère de principe du fonctionnement thermique) et les autres fonctions (sur-critère de multifonctionnalité).

Principe du fonctionnement thermique

Le principe de fonctionnement d'un système correspond à la manière dont chacun des éléments du système est agencé et exerce sa fonction.
Si le système présente une fonction de stockage, il sera évalué selon le critère d'optimisation de la configuration de stockage.

- La « **performance thermique du système solaire** » correspond à son efficacité en termes de production, production évaluée par rapport aux besoins. Le rendement ne peut bien évidemment, à ce stade de définition des systèmes, être calculé et estimé de manière précise. En revanche, on peut avoir une idée, au vu du principe de fonctionnement du système, de sa configuration et de son usage, quant à la qualité du rendement : médiocre, faible, moyenne ou bonne.
- La « **possibilité d'agir sur l'installation** » concerne surtout la possibilité pour les utilisateurs du système solaire de contrôler ou non l'installation (marche/arrêt, régulation de température…). Cette possibilité aura des conséquences sur le fonctionnement thermique de l'installation.
- L'« **optimisation de la configuration** » du composant solaire concerne la possibilité de modifier la configuration initiale du composant afin de rendre sa performance

meilleure. Par exemple la possibilité de changer l'inclinaison d'un élément de captage, ou la taille du volume du stockage, suivant l'application et la saison.

- La « **limitation des pertes** » du système solaire sera en effet d'autant plus efficace qu'il est mieux isolé, qu'il est protégé des conditions extérieures, et que la distance qui sépare les différents composants du système solaire est faible.
- Le « **confort thermique** » concerne principalement la température intérieure des pièces, sa répartition harmonieuse dans l'espace et la qualité de l'air ambiant (taux d'humidité, température, fraîcheur, propreté, salubrité). Il dépend du type de l'intégration solaire et de l'interaction système solaire/ bâtiment. En effet, si l'on considère le cas d'un capteur solaire intégré en façade ou en toiture, les pertes à l'arrière du capteur seront transmise directement vers l'ambiance intérieure du bâtiment.
- Le « **coût de l'exploitation** » se réfère aux coûts de consommation de l'énergie nécessaire au fonctionnement du système et de ses appoints.
- L'« **impact environnemental de l'exploitation** » est évalué en termes de création de déchets, de pollution et de toxicité, engendrées par l'exploitation.

Multifonctionnalité

On appréciera que le système combine d'autres fonctions que les fonctions thermiques premières : il n'en sera que plus intégré au bâtiment.

- La « **fonction d'isolation acoustique** » se réfère à la qualité et au confort acoustiques, en termes d'isolation et de correction acoustique. On pourra ainsi apprécier les matériaux « acoustiquement » absorbants.
- La « **fonction d'isolation thermique** » permet d'accroître le confort des usagers et de réduire les consommations d'énergie de chauffage. Elle est en outre bénéfique pour l'environnement dans la mesure où elle favorise la diminution des émissions de polluants. Elle est évaluée suivant le placement de l'isolant, la mise en œuvre de rupteurs des ponts thermiques, et la contribution de l'élément à la protection du bâtiment des influences thermiques extérieures. C'est ainsi qu'un capteur plat pourra jouer le rôle d'une enveloppe thermique et donc assurer une isolation thermique du bâtiment. L'isolation thermique s'avère donc être intéressante en termes pratiques, économiques et environnementaux.
- La « **fonction structurelle** » correspond à l'appartenance du système à l'ossature du bâtiment. Un système assurera donc une fonction structurelle, dès lors qu'il sera intégré à un élément de fondations, de murs porteurs, poteaux, charpentes, etc., et qu'il contribuera à soutenir le bâtiment ou lui donner sa rigidité.
- La « **sécurité d'usage** » concerne les risques qui pourront résulter du fonctionnement ou du non fonctionnement de l'élément solaire (comme par exemple la stagnation

lorsqu'il s'agit de capteurs à eau) et auxquels pourront faire face les utilisateurs (risque de brûlure, électrique, …).

La maintenance comprend l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.
Ces actions comprennent donc non seulement l'entretien, mais aussi l'inspection périodique de l'équipement, le remplacement systématique d'organes ou de parties d'organes, l'installation de nouveaux matériels, leur mise en œuvre, la réparation et la remise en marche après les pannes. La maintenance exige des qualifications spéciales de la part des personnes qui l'assurent. Nous distinguons trois critères de maintenance : la maintenabilité, la fiabilité et la durabilité.

Maintenabilité

Dans des conditions données d'utilisation pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est définie comme étant l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures ou des moyens prescrits. Elle peut se caractériser par les trois critères suivants : la limitation des interventions nécessaires, la sécurité d'intervention et la facilité d'intervention.

- La « **limitation des interventions** » peut être de divers ordres : entretien, inspection périodique, installation de nouveau matériels, réparation, etc. Essentielle à une utilisation confortable de l'ouvrage, elle est directement dépendante de la fiabilité du système.
- La « **sécurité d'intervention** » est estimée en termes notamment d'accessibilité des installations et composants. Les interventions sur un ouvrage seront en effet plus délicates si cet ouvrage est situé sur une toiture à versant, que s'il était situé à même le sol.
- La « **facilité d'intervention** » est évaluée en termes de démontabilité des éléments (sans détérioration), d'interchangeabilité des composants, de standardisation limitant ou évitant la constitution de stocks, de possibilité de vidange, etc.

Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné. On distinguera donc deux critères de fiabilité : la simplicité du fonctionnement de l'ouvrage et sa résistance.

- La « **simplicité de l'ouvrage** » correspond aux dispositions visant à limiter toute complexité technique de l'ouvrage, tant dans son état que dans son principe de fonctionnement. La simplicité de l'ouvrage sera donc évaluée en termes de faisabilité

technique de l'ouvrage lui-même (critère développé dans l'étape de fabrication), de possibilité de thermosiphon, de séparation du circuit de distribution…

- La « **résistance de l'ouvrage** » se réfère non seulement à la résistance aux chocs (grêle, balle de jeu…), mais aussi à la résistance au gel, à la surchauffe, à la corrosion, aux charges (poids propre) et à la surcharge (neige).

Durabilité

La durabilité n'est autre que la durée de vie ou durée de fonctionnement potentiel d'un bien, pour la fonction qui lui est assignée, dans des conditions d'utilisation et de maintenance données.

- La « **durée de vie** » du composant solaire intégré est définie comme la durée pendant laquelle la fonction ou le service demandé est fourni de manière adéquate.

5.2.3.4 Critères de la fin de vie

L'ouvrage est, à cette étape, démis de toute fonction et retiré de l'emplacement sur lequel on l'avait installé. On distinguera donc à cette phase : déconstruction et gestion des déchets.

Déconstruction

La déconstruction d'un ouvrage correspond à l'ensemble des actions visant à défaire la construction de l'ouvrage, sa structure, son organisation.
Comme les procédés de fabrication et d'installation précédemment cités, la déconstruction sera caractérisée par ses impacts économiques et environnementaux, ainsi que par un critère de faisabilité.

- Le « **coût de la déconstruction** » inclut les coûts de la main d'œuvre, de l'énergie et des outils nécessaires à la réalisation des différentes opérations de déconstruction.
- L'« **impact environnemental de la déconstruction** » est évalué en termes de création de déchets, de pollution et de toxicité, engendrées par les différentes opérations.
- La « **facilité de déconstruction** » sera évaluée au regard du temps de déconstruction et de la technicité requise. C'est ainsi qu'un système démontable s'avérera être plus aisé à déconstruire.

Gestion des déchets

Les déchets de démolition forment une masse considérable. Il faut savoir que les déchets de démolition sont déterminés par les caractéristiques intrinsèques des ouvrages à démolir. Les trois mesures principales de gestion de ces matières sont aujourd'hui le tri et le regroupement, le recyclage, et/ou l'élimination du composant par mise en décharge, par traitement physico-chimique ou encore par incinération.
Ainsi, on veillera à estimer la séparabilité des matériaux, la convertibilité des composants et de l'emplacement, et les impacts économiques et environnementaux des différents déchets et de leur traitement.

- La « **séparabilité des matériaux** » est leur qualité à être triés, rangés et classés en vue d'assurer leur orientation vers les voies de valorisation ou d'élimination les plus appropriées.
- La « **convertibilité des composants** » n'est autre que la possibilité de réutilisation des composants. Un composant sera en effet d'autant plus valorisé, d'un point de vue environnemental, qu'il est réutilisé en l'état ou après traitement, d'où l'intérêt porté sur les composants recyclables. Il est par ailleurs à souligner que l'enjeu et le développement des techniques de traitement des déchets laisse pressentir l'apparition de nombreuses techniques de revalorisation des déchets.
- La **« convertibilité de l'emplacement** » soulève la question du devenir architectural et technique du site d'implantation du système après déconstruction. L'emplacement pourra parfois être laissé en l'état, s'il permet toujours au bâtiment de répondre à ses obligations techniques et architecturales. De lourdes opérations pourront en revanche être envisagées si tel n'est pas le cas. Ces opérations peuvent aller du simple changement de fenêtres à la reconstruction de la toiture ou d'une façade.
- Le « **coût du traitement des déchets** » inclut les coûts de la main d'œuvre, de l'énergie et des outils nécessaires à la réalisation des différents traitements.
- L'« **impact environnemental des matériaux** » a déjà été développé dans l'étape de fabrication. Il est principalement évalué en termes de pollution et de toxicité.

5.2.4 La grille d'analyse

À partir de la définition des différents critères, nous pouvons identifier douze sur-critères principaux qui se déclinent en quarante-quatre critères appartenant chacun à une phase de vie du composant et à un type de critère. Nous avons groupé ces critères dans une grille d'analyse [Figure 5-3].

			Critères économiques	*Critères environnementaux*	*Critères techniques*	*Critères architecturaux*
Fabrication		**Choix des matières premières**				
		disponibilité des matériaux	■	■		
		performance des matériaux			■	
		Coût des matériaux	■			
		impact env. des matériaux		■		
		Procédé constructif				
		Faisabilité technique			■	
		possibilité d'industrialisation			■	
		coût de la fabrication	■			
		impact env. de la fabrication		■		
Mise en oeuvre		**Procédé d'installation**				
		coût de l'installation	■			
		facilité d'installation			■	
		impact env. de l'installation		■		
		Adaptabilité				
		optim. du positionnement			■	■
		adéq. en terme d'espace			■	■
		adéquation en terme d'usage			■	
		installation en réhabilitation			■	■
		adéquation en terme de poids				
		Esthétique				
		visibilité				■
		modulation			■	■
		acceptation				■
Vie en oeuvre	Exploitation	**Fonctionnement thermique**				
		Performance thermique			■	
		possibilité d'agir sur l'installation			■	
		optimisation de la configuration			■	■
		limitation des pertes			■	
		confort thermique			■	
		coût de l'exploitation	■			
		impact env. de l'exploitation		■		
		Multifonctionnalité				
		isolation acoustique			■	■
		isolation thermique			■	■
	Maintenance	fonction structurelle			■	■
		sécurité d'usage			■	■
		Maintenabilité				
		limitation des interventions			■	
		sécurité d'intervention			■	
		facilité d'intervention			■	
		Fiabilité				
		simplicité de l'ouvrage			■	
		résistance de l'ouvrage			■	
		Durabilité				
		durée de vie		■		
Fin de vie		**Déconstruction**				
		coût de la déconstruction	■			
		impact env. de la déconstruction		■		
		facilité de déconstruction			■	
		Gestion des déchets				
		séparabilité des matériaux		■	■	
		convertibilité des composants		■	■	
		convertibilité de l'emplacement			■	■
		coût du traitement des déchets	■			
		impact env. des matériaux		■		

Figure 5-3 : La grille d'analyse de l'intégration des composants solaires.

5.3 Application de l'analyse structurelle

5.3.1 Présentation de la méthode

La méthode d'analyse structurelle constitue un outil de structuration des idées et de réflexion sur le problème posé et crée un langage commun pour une réflexion prospective.
L'analyse structurelle vise la description la plus exhaustive possible du système associé à la problématique choisie. C'est une technique d'analyse de système qui se penche sur le domaine étudié en procédant par étapes successives : le recensement des variables descriptives du système et de son environnement et leur explication, le repérage des relations entre ces variables et la recherche des variables essentielles ou clés [Godet M, 1997]. Une présentation complète de cette méthode est rédigée dans l'annexe B-1.
La recherche des variables clés impose une vision globale du système étudié et exclut de se limiter dès le départ à l'analyse de quelques variables puisque, précisément, ce sont ces variables essentielles que l'on cherche à identifier parmi plusieurs dizaines d'autres.
La méthode d'analyse structurelle, enrichie par l'approche Micmac, a donc pour objectif de mettre en évidence des variables clés, cachées ou non, de poser les bonnes questions ou de faire réfléchir à des aspects contre-intuitifs du comportement du système. Ce qui surprend ne doit pas dérouter mais susciter une réflexion approfondie et un effort supplémentaire d'imagination. Elle vise à aider les groupes de réflexion prospective, et non à prendre leur place. Elle ne prétend pas décrire avec précision le fonctionnement du système, mais plutôt mettre en évidence les grands traits de son organisation.

5.3.2 Les variables internes et externes

L'ensemble des variables caractérisant le système étudié et son environnement sont définies et regroupées dans la grille d'analyse élaborée précédemment. Il conviendra toutefois de différencier les variables selon deux groupes : les variables internes qui caractérisent le système et les variables externes qui constituent son environnement [Tableau 5-1]. La définition de la frontière distinguant les variables internes des variables externes peut être difficile à faire, étant donné les multiples flux d'information, de matière et d'énergie, entre le système et son environnement. C'est pourquoi la définition des variables, en limitant le nombre d'interprétations des variables, était essentielle.

Variables internes	**Variables externes**
Performance des matériaux	Disponibilité des matériaux
Faisabilité technique	Coût des matériaux
Possibilité d'industrialisation	Impact env. des matériaux
Facilité d'installation	Coût de la fabrication
Optimisation du positionnement	Impact env. de la fabrication
Adéquation en terme d'espace	Coût de l'installation
Adéquation en terme d'usage	Impact env. de l'installation
Installation en réhabilitation	Acceptation
Adéquation en terme de poids	Confort thermique
Visibilité	Coût de l'exploitation
Modulation	Impact env. de l'exploitation
Performance thermique	Coût de la déconstruction
Possibilité d'agir sur l'installation	Impact env. de la déconstruction
Optimisation de la configuration	Convertibilité des composants
Limitation des pertes	Convertibilité de l'emplacement
Isolation acoustique	Coût du traitement des déchets
Isolation thermique	
Fonction structurelle	
Sécurité d'usage	
Limitation des interventions	
Sécurité d'intervention	
Facilité d'intervention	
Simplicité	
Résistance	
Durée de vie	
Facilité de déconstruction	
Séparabilité des matériaux	

Tableau 5-1 : Les variables internes et externes caractérisant l'intégration solaire.

5.3.3 La mise en relation des variables

Nous recherchons les relations entre les variables en construisant un tableau à double entrée formant la matrice structurelle du système. Pour chaque élément matriciel représentant une liaison d'une variable sur une autre variable, nous nous interrogeons sur la nature de l'influence directe. Avant de conclure à l'existence d'une liaison entre deux variables, il nous faut répondre systématiquement à trois questions [Godet M., 1997] :

1. Y-a-t-il bien influence directe de la variable i sur la variable j, ou bien la relation n'est-elle pas plutôt de j vers i ?
2. Y-a-t-il influence de i sur j, ou bien n'y-a-t-il pas colinéarité, une troisième variable k agissant sur i et j ?
3. La relation de i à j est-elle directe, ou bien passe-t-elle par l'intermédiaire d'une autre variable r de la liste ?

En réponse à la première question : il est évident que si la performance thermique varie, le coût d'exploitation change aussi. Il y a donc bien influence de la variable «performance thermique » sur la variable « coût d'exploitation » et non de la variable « coût d'exploitation » sur la variable «performance thermique ».

En réponse à la deuxième question, il suffit de reprendre le même raisonnement : si la performance thermique diminue, la production énergétique du système diminue, ceci entraîne une augmentation directe du coût d'exploitation (par exemple par l'utilisation d'énergie d'appoint). Il y a donc bien influence de la variable « performance thermique» sur la variable « coût d'exploitation ».

En réponse à la troisième question, toujours avec le même raisonnement, il est clair que la relation entre la variable « performance thermique » et la variable « coût d'exploitation » est directe et ne passe pas par l'intermédiaire d'une autre variable de la liste.

Cette procédure d'interrogation systématique permet d'éviter de nombreuses erreurs dans le remplissage de la matrice. Elle permet de vérifier systématiquement l'existence d'une véritable liaison directe entre deux variables.

Il convient de noter que le remplissage de la matrice s'il est en général qualitatif (existence ou non-existence des relations), peut être aussi quantifié. Dans notre étude, ces intensités sont notées respectivement par les valeurs 3, 2, 1 et 0 :

- La valeur 3 indique une influence forte d'une variable sur une autre ;
- La valeur 2 indique une intensité moyenne ;
- La valeur 1 indique une intensité faible ;
- La valeur 0 indique qu'il n'y a pas d'influence.

Il sera dès lors possible et intéressant d'introduire une certaine dynamique et de tester la sensibilité des résultats en fonction de l'intensité des relations prises en compte.

Le « coût d'exploitation » étant directement dépendant de la production d'énergie par le système solaire, l'influence de la variable « performance thermique » sur la variable « coût d'exploitation » est « forte ». Ainsi, on affectera à l'élément matriciel situé sur la ligne relative à la variable « rendement » et sur la colonne relative à la variable « coût d'exploitation », la valeur de 3.

Lors de la phase de remplissage de la matrice, on a ainsi répété ces mêmes opérations pour chacune des cases de la matrice structurelle [Tableau 5-2, Tableau 5-3].

	Influence de sur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Variables internes	1- Performance des matériaux	0	0	0	0	0	3	2	0	2	0	0	3	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	2- Faisabilité technique	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	3	1	0	1	0
	3- Possibilité d'industrialisation	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1
	4- Facilité d'installation	1	0	0	0	2	1	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	2	1
	5- Optimisation du positionnement	2	2	0	1	0	3	0	2	0	2	2	3	0	2	0	1	1	1	3	0	0	1	0	1	0	0	0
	6- Adéquation en terme d'espace	0	0	2	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7- Adéquation en terme d'usage	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8- Installation en réhabilitation	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9- Adéquation en terme de poids	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	10- Visibilité	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0
	11- Modulation	0	0	0	0	1	2	0	2	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	2	0	0	0	1
	12- Performance thermique	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13- Agir sur l’installation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
	14- Optim. de la configuration	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	1	0
	15- Limitation des pertes	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	2	2	0	1	0
	16- Isolation acoustique	1	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
	17- Isolation thermique	1	2	1	2	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	1	0
	18- Fonction structurelle	0	2	1	1	1	0	1	2	3	1	1	0	0	3	0	0	0	0	0	1	1	2	0	3	0	1	0
	19- Sécurité d’usage	0	2	0	1	0	0	3	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0
	20- Limitation des interventions	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
	21- Sécurité d'intervention	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0
	22- Facilité d'intervention	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	2	1
	23- Simplicité	0	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	3	0	3	0	2	0	3	0
	24- Résistance	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	0
	25- Durée de vie	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	26- Facilité de déconstruction	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	27- Séparabilité des matériaux	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	3	0
Variables internes	28- Disponibilité des matériaux	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0
	29- Coût des matériaux	0	0	2	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30- Impact env. des matériaux	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
	31- Coût de la fabrication	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	32- Impact env. de la fabrication	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33- Coût de l'installation	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	34- Impact env. de l'installation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	35- Acceptation	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36- Confort thermique	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	37- Coût de l'exploitation	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	38- Impact env. de l'exploitation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	39- Coût de la déconstruction	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40- Impact env. de la déconstruction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	41- Conv. des composants	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	42- Conv. de l’emplacement	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	43- Coût du traitement des déchets	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 5-2 : Matrice d’analyse structurelle des influences sur les variables internes.

	Influence de sur	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**
Variables internes	1- Performance des matériaux	1	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	1	1	0
	2- Faisabilité technique	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3- Possibilité d'industrialisation	0	0	0	3	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4- Facilité d'installation	0	0	0	0	0	3	2	2	0	0	0	2	1	0	0	0
	5- Optimisation du positionnement	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6- Adéquation en terme d'espace	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7- Adéquation en terme d'usage	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	8- Installation en réhabilitation	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	9- Adéquation en terme de poids	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10- Visibilité	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	11- Modulation	0	0	0	2	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	12- Performance thermique	0	0	0	0	0	2	0	2	3	3	3	0	0	0	0	0
	13- Agir sur l'installation	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0
	14- Optim. de la configuration	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	15- Limitation des pertes	0	0	0	1	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
	16- Isolation acoustique	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
	17- Isolation thermique	0	0	0	0	0	1	0	2	3	2	0	0	0	0	0	0
	18- Fonction structurelle	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	19- Sécurité d'usage	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	20- Limitation des interventions	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0
	21- Sécurité d'intervention	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22- Facilité d'intervention	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0
	23- Simplicité	0	0	0	2	1	2	1	2	0	1	0	0	1	0	0	0
	24- Résistance	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	25- Durée de vie	0	0	3	0	2	0	2	3	0	3	3	0	2	0	0	1
	26- Facilité de déconstruction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2	0
	27- Séparabilité des matériaux	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3
Variables internes	28- Disponibilité des matériaux	0	3	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	3
	29- Coût des matériaux	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1
	30- Impact env. des matériaux	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	3	0
	31- Coût de la fabrication	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32- Impact env. de la fabrication	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	33- Coût de l'installation	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	34- Impact env. de l'installation	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	35- Acceptation	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	36- Confort thermique	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	37- Coût de l'exploitation	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	38- Impact env. de l'exploitation	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0
	39- Coût de la déconstruction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40- Impact env. de la déconstruction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	41- Conv. des composants	2	1	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
	42- Conv. de l'emplacement	0	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
	43- Coût du traitement des déchets	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 5-3 : Matrice d'analyse structurelle des influences sur les variables externes.

Le taux de remplissage de la matrice structurelle est satisfaisant puisqu'il est de l'ordre de 18,5 %. En effet, l'expérience semble montrer qu'un bon taux de remplissage de la matrice doit se situer entre 15% et 25% suivant la dimension de la matrice. Des taux supérieurs (30% à 35%) sont révélateurs d'un remplissage excessif : des relations induites ayant été, à tort, considérées comme directes.

Les résultats sont représentés dans le plan motricité – dépendance, comme indiqué dans l'annexe B-1, qui permet d'analyser les variables en fonction du rôle qu'elles jouent dans l'intégration des composants solaires dans le bâtiment [Figure 5-4].

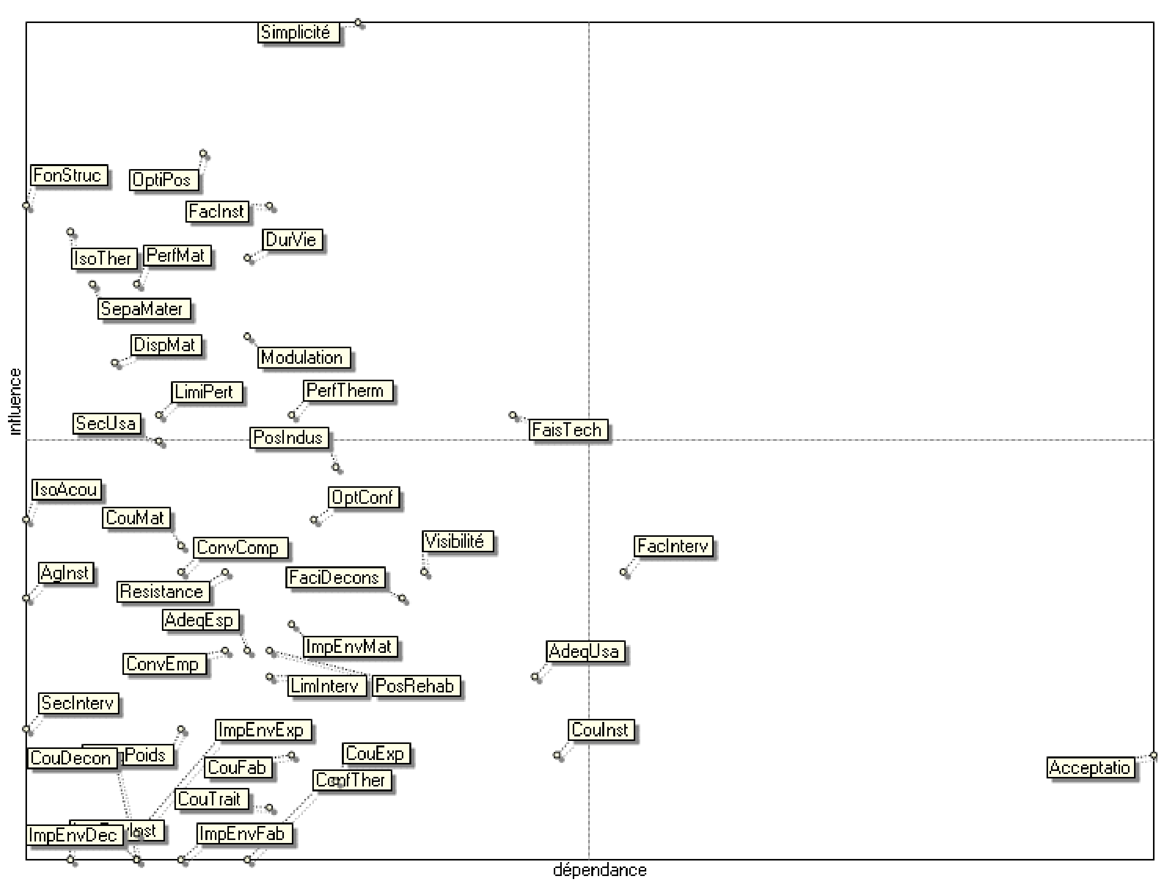


Figure 5-4 : Plan des motricités / dépendances directes.

La forme du nuage de points qui se dessine sur le plan de la figure suivante laisse apparaître une stabilité relative du phénomène étudié [Figure 5-5].

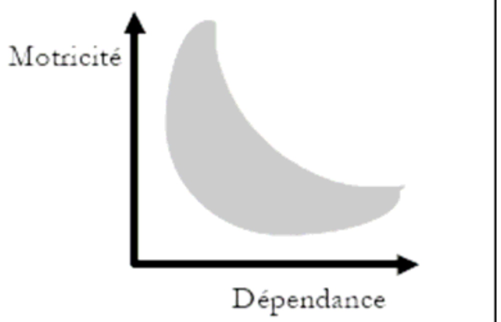


Figure 5-5 : Nuage de points du système.

5.3.4 Classement direct et indirect

L'élaboration de la matrice structurelle et la représentation du plan motricité – dépendance montrent que certaines variables de l'intégration sont plus importantes que d'autres, et pourront être identifiées comme variables essentielles pour l'intégration. Mais l'influence directe faible d'une variable peut être renforcée à travers des influences d'autres variables particulièrement fortes. Dans ce cas, nous devons prendre en considération les relations indirectes qui permettent la diffusion des impacts des variables par les chemins et les boucles de rétroaction.

Nous utilisons alors la méthode de multiplication matricielle appliquée à la matrice structurelle afin de pouvoir déceler les variables qui peuvent être importants comptes tenus des liaisons indirectes et donc de mieux comprendre la dynamique de la grille des variables d'intégration. L'application de la méthode MICMAC© (Matrice d'Impacts Croisés-Multiplication Appliquée à une classement) qui consiste à élever successivement la matrice structurelle en puissance, nous a permis de déceler les influences indirectes.

S'il est démontré que toute matrice doit converger vers une stabilité au bout d'un certain nombre d'itérations (généralement 4 à 5 pour une matrice de taille 50), il est apparu intéressant de pouvoir suivre l'évolution de cette stabilité au cours des multiplications successives. En l'absence de critères mathématiquement établis, il a été choisi de s'appuyer sur le nombre de permutations nécessaires à chaque itération (tri à bulles) pour classer l'ensemble des variables en influence et en dépendance. Un résultat de 100% signifie que le nombre de permutations nécessaires au classement à l'itération i est identique à celui nécessaire à l'itération i-1 et que donc l'application est stable. Les résultats peuvent ainsi varier autour de 100% [Tableau 5-4].

Itération	Influence	Dépendance
1	101 %	98 %
2	106 %	99 %
3	110 %	102 %
4	100 %	101 %
5	101 %	100 %
6	100 %	100 %
7	100 %	100 %
8	100 %	100 %
9	100 %	100 %

Tableau 5-4 : Stabilité à partir de la matrice des influences directes.

Il apparaît que le système devient stable à partir de la puissance 6 (M^6). Ainsi, nous pouvons obtenir le nouveau classement de chacune de variables.

5.3.4.1 Classement motricité

Dans le tableau de la figure suivante, pour chacune des variables, est donné le rang pour les relations directes (M) et les relations indirectes (M^6) ainsi que les variations de ce rang entre M et M^6 (désignée par les flèches). Les rangs sont classés de 1 à 43 par ordre décroissant de motricité [Figure 5-6].

Rang	Direct (M)	Indirect (M^6)
43	Impact environnemental de la fabrication	Impact environnemental de la déconstruction
42	Impact environnemental de l'installation	Impact environnemental de l'installation
41	Confort thermique	Confort thermique
40	Coût de la déconstruction	Impact environnemental de la fabrication
39	Impact environnemental de la déconstruction	Impact environnemental de l'exploitation
38	Impact environnemental de l'exploitation	Coût de la déconstruction
37	Coût du traitement des déchets	Coût de l'exploitation
36	Coût de l'exploitation	Coût du traitement des déchets
35	Coût de la fabrication	Coût de l'installation
34	Coût de l'installation	Convertibilité de l'emplacement
33	Acceptation	Limitation des interventions
32	Adéquation en terme de poids	Acceptation
31	Sécurité d'intervention	Coût de la fabrication
30	Adéquation en terme d'usage	Impact environnemental des matériaux
29	Limitation des interventions	Facilité de déconstruction
28	Adéquation en terme d'espace	Convertibilité des composants
27	Possibilité d'installation en réhabilitation	Possibilité d'agir sur l'installation
26	Convertibilité de l'emplacement	Sécurité d'intervention
25	Impact environnemental des matériaux	Durée de vie
24	Possibilité d'agir sur l'installation	Résistance
23	Facilité de déconstruction	Adéquation en terme de poids
22	Visibilité	Facilité d'intervention
21	Facilité d'intervention	Coût des matériaux
20	Résistance	Adéquation en terme d'espace
19	Convertibilité des composants	Possibilité d'installation en réhabilitation
18	Coût des matériaux	Adéquation en terme d'usage
17	Optimisation de la configuration	Performance thermique
16	Fonction isolation acoustique	Possibilité d'Industrialisation
15	Possibilité d'Industrialisation	Disponibilité des matériaux
14	Sécurité d'usage	Visibilité
13	Faisabilité technique	Fonction isolation acoustique
12	Performance thermique	Séparabilité des matériaux
11	Limitation des pertes	Faisabilité technique
10	Disponibilité des matériaux	Performance des matériaux
9	Modulation	Optimisation de la configuration
8	Performance des matériaux	Sécurité d'usage
7	Séparabilité des matériaux	Limitation des pertes
6	Durée de vie	Modulation
5	Fonction isolation thermique	Facilité d'installation
4	Facilité d'installation	Fonction isolation thermique
3	Fonction structurelle	Simplicité
2	Optimisation du positionnement	Fonction structurelle
1	Simplicité	Optimisation du positionnement

Figure 5-6 : Classement direct et indirect des critères suivant la motricité.

5.3.4.2 Classement dépendance

Comme pour la motricité, le classement des variables de l'intégration est donné dans le tableau de la figure suivante. Les rangs sont classés de 1 à 43 par ordre décroissant de dépendance [Figure 5-7].

Rang	Direct (M)	Indirect (M^6)
43	Possibilité d'agir sur l'installation	Fonction isolation acoustique
42	Fonction isolation acoustique	Fonction structurelle
41	Fonction structurelle	Possibilité d'agir sur l'installation
40	Sécurité d'intervention	Disponibilité des matériaux
39	Fonction isolation thermique	Fonction isolation thermique
38	Impact environnemental de l'installation	Sécurité d'intervention
37	Séparabilité des matériaux	Impact environnemental de l'installation
36	Disponibilité des matériaux	Coût des matériaux
35	Performance des matériaux	Performance des matériaux
34	Impact environnemental de l'exploitation	Confort thermique
33	Coût de la déconstruction	Impact environnemental de l'exploitation
32	Impact environnemental de la déconstruction	Limitation des pertes
31	Limitation des pertes	Convertibilité des composants
30	Sécurité d'usage	Coût de la déconstruction
29	Adéquation en terme de poids	Coût du traitement des déchets
28	Coût des matériaux	Séparabilité des matériaux
27	Impact environnemental de la fabrication	Impact environnemental de la déconstruction
26	Convertibilité des composants	Convertibilité de l'emplacement
25	Optimisation du positionnement	Résistance
24	Résistance	Performance thermique
23	Convertibilité de l'emplacement	Optimisation du positionnement
22	Adéquation en terme d'espace	Impact environnemental des matériaux
21	Modulation	Adéquation en terme de poids
20	Durée de vie	Limitation des interventions
19	Confort thermique	Sécurité d'usage
18	Facilité d'installation	Impact environnemental de la fabrication
17	Possibilité d'installation en réhabilitation	Facilité d'installation
16	Limitation des interventions	Adéquation en terme d'espace
15	Coût du traitement des déchets	Possibilité d'installation en réhabilitation
14	Performance thermique	Durée de vie
13	Impact environnemental des matériaux	Optimisation de la configuration
12	Coût de la fabrication	Modulation
11	Optimisation de la configuration	Coût de l'exploitation
10	Possibilité d'Industrialisation	Simplicité
9	Coût de l'exploitation	Coût de la fabrication
8	Simplicité	Possibilité d'Industrialisation
7	Facilité de déconstruction	Facilité de déconstruction
6	Visibilité	Faisabilité technique
5	Faisabilité technique	Adéquation en terme d'usage
4	Adéquation en terme d'usage	Facilité d'intervention
3	Coût de l'installation	Visibilité
2	Facilité d'intervention	Coût de l'installation
1	Acceptation	Acceptation

Figure 5-7 : Classement direct et indirect des critères suivant la dépendance.

5.3.5 Identification des variables clés

Les résultats des classements directs et indirects, ainsi que les plans motricité – dépendance (intrinsèques à chaque type de proposition d'intégration), directement issus des matrices d'analyse structurelle, permettront de mettre en évidence les variables essentielles du système. Ce sont ces variables qui pourront guider nos choix dans la réflexion sur des solutions d'intégration solaire. La connaissance de ces variables clés aura une grande influence sur

l'analyse des propositions et sera déterminante lors de la phase de recherche des perspectives d'évolution des propositions.

Plusieurs critères s'avèrent être très moteurs, donc très influents sur le système, par conséquent sur le résultat final de l'évaluation. Les variables très motrices sont : « L'optimisation du positionnement », « la simplicité de l'ouvrage », « la facilité installation », « la fonction structurelle », « la fonction isolation thermique » et « la modulation du système solaire ». Donc, l'évolution de ces critères pourra être un facteur essentiel dans la mesure où on cherche à améliorer des propositions d'intégration formulées.

D'autres variables peuvent jouer des rôles moyennement importants sur le comportement du système, en étant moyennement motrices et peu dépendantes. Dans cette catégorie, nous trouvons les critères d'évaluation suivants : « La limitation des pertes », « la séparabilité des matériaux », « la sécurité d'usage », « la performance matériaux », « l'optimisation de la configuration », « La faisabilité technique » et « la visibilité du système solaire ». Ainsi, l'amélioration de ces critères aura un impact conséquent sur la qualité de l'intégration.

Donc une attention ou une amélioration apportée à un ou à plusieurs de ces critères très influents, ou moyennement influents et peu dépendants, apportera une amélioration importante au niveau du critère « acceptation des usagers », qui est une variable très dépendante, et qui sera nettement bien améliorée, et par conséquence l'intégration sera mieux évaluée globalement. Deux autres variables peuvent être améliorées directement à travers les améliorations apportées aux variables motrices comme étant des variables moyennement dépendantes et peu motrices : « la facilité d'intervention » et « le coût de l'installation ».

5.3.6 Les limites de l'analyse

La méthode d'analyse structurelle a pour but d'aider le décideur et non de prendre sa place. Elle ne consiste pas en une description précise de la structure et du fonctionnement du système, mais bien en une mise en évidence des variables clés, et donc des grands traits de l'organisation du système.

Il convient d'utiliser les résultats en gardant présentes à l'esprit les limites de notre analyse. La première limite provient du caractère subjectif de la liste de variables. Les précautions prises sont une garantie, mais pour des raisons pratiques, le nombre de variables ne peut excéder quelques dizaines, cela nous a conduit à regrouper des sous-variables ayant trait à une même dimension du problème. La seconde limite est liée au caractère subjectif du remplissage de la matrice et de l'intensité donnée aux liaisons entre les variables. Une matrice n'est jamais la réalité, mais un moyen de la regarder, une photographie. Comme toute photographie, l'analyse structurelle montre des choses traduisant une partie de la réalité, mais révèle aussi le talent du photographe et la qualité de son équipement.

5.4 Elaboration de la méthode d'évaluation d'intégration SISBat

Nous proposons dans ce paragraphe une description détaillée de la méthode d'évaluation du Solaire Intégré dans la Structure Bâtie (SISBat).

L'originalité de cette méthode est de s'appuyer à la fois sur une grille d'analyse qui donne une description des éléments du système de composant solaire intégré dans le bâtiment, ainsi que sur une analyse structurelle du système. Elle est constituée de trois phases :

- phase d'analyse et de notation des critères d'analyse ;
- phase de calcul par pondération des critères suivant les motricités indirectes obtenues à partir de la matrice structurelle des influences indirectes ;
- phase d'évaluation et d'analyse des résultats en vue de propositions d'amélioration.

5.4.1 Notation des critères d'analyse

Il s'agit dans la première étape de la façon de remplir la grille d'analyse. Ce remplissage est purement qualitatif. Il consiste, pour une proposition d'intégration donnée, à affecter une note à chacun des critères d'évaluation.

Dans la mesure où les propositions d'intégration n'ont été définies qu'au stade de principe, et dans la mesure où ces propositions n'ont pas été mises en œuvre, l'estimation de chacune des propositions au regard de chacun des critères peut être difficile (d'autant plus que ce remplissage incombe normalement à un groupe d'experts). Il est en effet, à ce stade de définition de propositions, relativement délicat d'estimer tant un impact environnemental qu'un coût.

L'échelle de notation de la grille doit donc être suffisamment petite, sans pour autant se limiter à un tout ou rien, qui ne permettrait pas de profiter pleinement de la méthode d'analyse. C'est pourquoi une échelle de notation allant de 0 à 3 s'avère être un bon compromis.

Ainsi, les notes seront respectivement de 0, 1, 2 ou 3, selon que la réponse des propositions à chacun des critères d'analyse est nulle, moyenne, bonne ou très bonne. Une observation correspondant à chaque critère est faite dans le but de justifier chaque note d'évaluation attribuée.

5.4.2 Pondération des variables selon la motricité

Les classements indirects de motricité, et plus précisément les valeurs des motricités de chacune des variables, ramenées en pourcentage, seront à la base de la définition d'une pondération des notes données aux propositions (en phase de remplissage de la grille d'analyse), relativement à chaque variable.

En effet, en notant, pour l'analyse d'une proposition:

- $(c_k)_k$, l'ensemble des critères considérés pour l'analyse ; ces critères correspondent au niveau le plus bas (3ème niveau) de la grille d'analyse : impact environnemental des matériaux, coût des matériaux, etc.

- $(C_i)_i$, l'ensemble des sur-critères correspondant au 2[ème] niveau de la grille d'analyse : choix des matières premières, procédé constructif, etc.
- $(E_j)_j$, l'ensemble des étapes du cycle de vie de la proposition considérée; ces étapes constituent le 1er niveau de la grille d'analyse : fabrication, mise en œuvre, etc.
- $(n_{c_k})_k$, l'ensemble des notes affectées (lors du remplissage de la grille d'analyse) à chacun des critères considérés : $\forall k$, $n_{c_k} \in \{0,1,2,3\}$.
- $(m_{c_k})_k$, l'ensemble des valeurs des motricités de chacune des variables, ramenées en pourcentage : $\forall k$, $m_{c_k} \in [0,1]$. Ces valeurs seront utilisées comme coefficients de pondération des notes n_{c_k} affectées à chacun des critères considérés.

Il est dès lors possible de définir les termes suivants :

$$\left(m_{C_i} = \sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right)_i \qquad \text{Équation 5-1}$$

$(m_{C_i})_i$ correspond à la somme des valeurs de motricité de chacune des variables dont dépend le sur-critère i ;

$$n_{C_i} = \frac{\sum_{c_k \in C_i} n_{c_k} . m_{c_k}}{\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k}} = \frac{\sum_{c_k \in C_i} n_{c_k} . m_{c_k}}{m_{C_i}} \qquad \text{Équation 5-2}$$

$(n_{C_i})_i$ est défini comme l'ensemble des notes (pondérées selon la motricité indirecte des variables) affectées à chacun des sur-critères : $\forall i$, $n_{C_i} \in [0,3]$;

$$\left(m_{E_j} = \sum_{C_i \in E_j} m_{C_i} = \sum_{C_i \in E_j} \left(\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right) \right)_j \qquad \text{Équation 5-3}$$

$(m_{E_j})_j$ correspond à la somme des valeurs de motricité de chacune des sur-critères dont dépend l'étape j ;

$$n_{E_j} = \frac{\sum_{C_i \in E_j} \left(n_{C_i} \cdot m_{C_i} \right)}{\sum_{C_i \in E_j} \left(m_{C_i} \right)} = \frac{\sum_{C_i \in E_j} \left(n_{C_i} \cdot m_{C_i} \right)}{m_{E_j}} \qquad \text{Équation 5-4}$$

ou encore par substitution des $(n_{C_i})_i$ et $(m_{C_i})_i$:

$$n_{E_j} = \frac{\sum_{C_i \in E_j} \left(\frac{\sum_{c_k \in C_i} n_{c_k} \cdot m_{c_k}}{\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k}} \cdot \sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right)}{\sum_{C_i \in E_j} \left(\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right)} \qquad \text{Équation 5-5}$$

$\left(n_{E_j}\right)_j$ est donc défini comme l'ensemble des notes (pondérées) affectées à chacune des étapes du cycle de vie de la proposition : $\forall j$, $n_{E_j} \in [0,3]$;

$$n_G = \frac{\sum_j \left(n_{E_j} . m_{E_j}\right)}{\sum_j \left(m_{E_j}\right)}$$ Équation 5-6

ou encore :

$$n_G = \frac{\sum_j \left(\frac{\sum_{C_i \in E_j} \left(\frac{\sum_{c_k \in C_i} n_{c_k} \cdot m_{c_k}}{\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k}} \cdot \sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right)}{\sum_{C_i \in E_j} \left(\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right)} \cdot \sum_{C_i \in E_j} \left(\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right) \right)}{\sum_j \left(\sum_{C_i \in E_j} \left(\sum_{c_k \in C_i} m_{c_k} \right) \right)}$$ Équation 5-7

n_G est défini comme la note globale (pondérée selon la motricité) de la proposition d'intégration considérée : $n_G \in [0,3]$.

5.4.3 Evaluation et comparaison des propositions

Si les valeurs, m_{c_k} , m_{C_i} , m_{E_j} ne seront utiles qu'au développement de la méthode d'analyse, chacune des valeurs n_{c_k} , n_{C_i} , n_{E_j} et n_G pourra en revanche permettre d'évaluer les propositions et de les comparer, et ce au regard des trois niveaux hiérarchiques de la grille d'analyse et au niveau global de la solution.

Ces valeurs, comprises entre 0 et 3 seront ainsi assimilées à des notes : plus les valeurs seront élevées, mieux la proposition considérée répondra aux critères d'analyse.

Enfin, des notes peu élevées pourront souligner, outre le fait que la réponse de la proposition aux critères d'analyse est insuffisante, quelques perspectives d'évolution.

La méthode ayant été définie, on se propose de l'appliquer aux propositions d'intégration énoncées dans la partie précédente.

Il s'agira dans un premier temps de remplir les grilles d'analyse puis les matrices d'analyse structurelle, et dans un second temps, d'appliquer les règles de calcul précédemment définies, afin de déterminer chacune des valeurs n_{C_i} , n_{E_j} et n_G , et ce, pour chacune des propositions analysées.

5.5 Application de la méthode SISBat

L'application de la méthode visera d'une part à évaluer et comparer les différentes propositions analysées, et d'autre part à mettre en évidence les perspectives d'évolution de ces propositions.

5.5.1 Analyse des propositions

Nous avons choisi d'appliquer la méthode aux six propositions d'intégration solaire formulées et analysées à la fin de la partie précédente : intégration de capteur dans mur en maçonnerie type III, dans le bardage en acier simple, dans la façade rideau, dans l'allège de fenêtre dans une façade légère, dans la façade panneau en maçonnerie, et dans la façade à vitrage parclosé. Pour chacune de ces propositions, nous avons d'abord rempli la grille de critères d'analyse. Les liaisons indirectes entre ces critères sont mises en évidence par la matrice d'analyse structurelle indirecte et l'application de la méthode de pondération par motricité a permis d'évaluer, à plusieurs niveaux, la qualité de l'intégration solaire dans le bâtiment, et de révéler les points faibles et les points forts de la proposition étudiée.

Dans le tableau suivant, nous présentons la procédure utilisée dans le remplissage de la grille d'analyse par les valeurs d'évaluation des critères, pour la solution d'intégration dans la façade à vitrage parclosé. Pour chaque critère, une note d'évaluation est attribuée et une observation sert à justifier notre choix [Tableau 5-5]. Les grilles remplies des autres solutions sont présentées dans l'annexe B-2.

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Les matériaux utilisés sont ceux d'un capteur traditionnel. Ils sont aujourd'hui désignés comme performants et permettent d'avoir un bon rendement.
2- Faisabilité technique	3	La fabrication des modules est relativement simple, dans la mesure où elle est réalisée par assemblage.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Les modules sont fabriqués par simple assemblage de composants standard, ce qui laisse penser qu'ils pourront être industrialisables.
4- Facilité d'installation	2	Dans la mesure où il suffit de visser et clipser les différents composants, l'installation est relativement simple.
5- Optimisation du positionnement	2	Les capteurs sont destinés à être installés verticalement, en façade de bâtiment, une position non optimale au rendement thermique du capteur.
6- Adéquation en terme d'espace	3	La surface pourra être adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'ECS, au plancher chauffant, ou au rafraîchissement solaire par dessiccation.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	2	Par remplacement d'un panneau de façade par démontage du panneau existant puisque ceux-ci sont assemblés sur l'ossature secondaire.
9- Adéquation en terme de poids	1	L'ajout du capteur risque de créer une surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphie ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours, mais élimination de la transparence de l'élément d'origine
11-Modulation	3	Il est possible de modifier la taille des modules solaires, les types de vitrage, ainsi que la couleur de la peinture de l'absorbeur, en fonction des besoins ou l'envie des architectes afin qu'ils puissent composer la façade selon la trame de la menuiserie.
12- Performance thermique	2	La présence des vitrages et des isolants, et l'utilisation de couleurs sombres laissent penser que la performance thermique devra être satisfaisante.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé sera munie d'une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de le contrôler.

Critères	Notes	Observations
14- Optimisation de la configuration	0	Les modules solaires sont fixes, la surface de captage ne peut pas suivre la course du soleil.
15- Limitation des pertes	3	Les pertes sont limitées, côté intérieur, par une couche d'isolant thermique, et côté extérieur par le vitrage et une lame d'air.
16- Fonction acoustique	1	Le capteur, en protégeant l'intérieur du bâtiment des conditions climatiques extérieures, permet en outre d'isoler acoustiquement le bâtiment des bruits extérieurs.
17- Fonction isolation thermique	2	Isolation assurée par un isolant dimensionné pour minimiser les pertes pour le capteur et pour l'isolement thermique du bâtiment.
18- Fonction structurelle	0	Les modules solaires sont formés essentiellement de cuivre ou d'aluminium, de vitrage et des matériaux isolants légers, ils ne peuvent donc aucunement s'intégrer dans la structure du bâtiment.
19- Sécurité d'usage	1	Risques pour la sécurité des usagers si les liaisons entre les capteurs sont accessibles par derrière, ou si les capteurs sont accessible de devant.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	1	Système accessible par l'extérieure.
22- Facilité d'intervention	2	Il est possible de vidanger le système et démonter les capots.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Si le système résiste globalement aux risques engendrés par les conditions climatiques (gel, surchauffe), son vitrage extérieur peut en revanche être endommagé par quelques chocs de grêle, ou de projectile.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.
26- Facilité de déconstruction	3	Le système est entièrement démontable.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les composants sont des pièces faites sur mesure selon l'architecture et la trame du bâtiment mais sont simple de fabrication.
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.
33- Coût de l'installation	2	Par rapport à la solution d'origine, le surcoût provient de l'ajout de l'absorbeur, de l'isolant et du réseau hydraulique.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	1	L'intégration risque de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	2	L'utilisation de l'énergie solaire devrait avoir un bon impact environnemental pendant l'exploitation, surtout pour la réduction des émissions de GES, mais si de grandes superficies de captage sont installées il y aura un risque de créer des îlots de chaleur.

Critères	Notes	Observations
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage de la menuiserie par les capots, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsage » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	2	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	2	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par des vitrages normaux ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les capteurs laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Tableau 5-5 : Notation n_{ck} de la façade à vitrage parclosé.

Selon le même procédé, les grilles d'analyse des cinq autres solutions sont remplies. Dans le tableau suivant est présentée la totalité des notes affectées aux critères pour chacune des six solutions d'intégration étudiées [Tableau 5-6].

Critères/ Notes	Mur en maçonnerie de type III	Bardage acier simple	Allège de fenêtre	Façade panneau maçonnerie	Façade rideau	Vitrage parclosé
1- Performance des matériaux	2	2	2	2	2	2
2- Faisabilité technique	3	3	3	1	3	3
3- Possibilité d'industrialisation	3	3	3	3	3	3
4- Facilité d'installation	3	3	3	2	2	2
5- Optimisation du positionnement	2	2	3	2	2	2
6- Adéquation en terme d'espace	3	3	3	3	3	3
7- Adéquation en terme d'usage	3	3	3	3	3	3
8- Installation en réhabilitation	3	3	3	2	2	2
9- Adéquation en terme de poids	3	1	2	2	2	1
10-Visibilité	2	2	2	2	2	2
11-Modulation	3	3	3	3	3	3
12- Performance thermique	2	2	3	2	2	2
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	2	2	2	2	2
14- Optimisation de la configuration	1	1	2	1	1	0
15- Limitation des pertes	3	3	3	3	3	3
16- Fonction acoustique	3	3	3	2	2	1
17- Fonction isolation thermique	3	3	3	3	3	2
18- Fonction structurelle	0	0	0	1	1	0
19- Sécurité d'usage	1	1	1	1	1	1
20- Limitation des interventions	2	2	2	2	2	2
21- Sécurité d'intervention	2	2	2	2	2	1
22- Facilité d'intervention	2	2	2	2	2	2
23- Simplicité	2	2	2	2	2	2
24- Résistance	2	2	2	2	2	2
25- Durée de vie	3	3	3	3	3	3
26- Facilité de déconstruction	3	3	3	3	3	3
27- Séparabilité des matériaux	2	2	2	2	2	2
28- Disponibilité des matériaux	3	3	3	3	3	3

Critères/ Notes	**Mur en maçonnerie de type III**	**Bardage acier simple**	**Allège de fenêtre**	**Façade panneau maçonnerie**	**Façade rideau**	**Vitrage parclosé**
29- Coût des matériaux	3	3	3	3	3	3
30- Impact env. des matériaux	1	1	1	1	1	1
31- Coût de la fabrication	2	2	2	2	2	2
32- Impact env. de la fabrication	3	3	3	3	3	3
33- Coût de l'installation	3	3	3	2	2	2
34- Impact env. de l'installation	3	3	3	3	3	3
35- Acceptation	2	2	2	2	2	2
36- Confort thermique	2	2	1	1	1	1
37- Coût de l'exploitation	3	3	3	3	3	3
38- Impact env. de l'exploitation	3	3	3	3	3	2
39- Coût de la déconstruction	3	3	3	3	3	3
40- Impact env. de la déconstruction	3	3	3	3	3	3
41- Convertibilité des composants	3	3	3	2	2	2
42- Convertibilité de l'emplacement	3	3	3	2	2	2
43- Coût des traitements	1	1	1	1	1	1

Tableau 5-6 : Notation n_{ck} des six solutions d'intégration.

5.5.2 Résultats de l'analyse

Les résultats sont calculés conformément aux règles présentées dans la partie « Pondération des variables selon la motricité ».

Chaque proposition d'intégration analysée se voit donc affectée dix huit notes, dont :

- Douze notes correspondant aux douze sur-critères ;
- Cinq notes d'évaluation correspondant aux étapes du cycle de vie : A cause du grand nombre de critères de l'étape « vie en œuvre » et pour avoir des résultats plus explicites et équilibrés, nous avons décidé de séparer les résultats d'évaluation en deux familles : l'exploitation et la maintenance ;
- Une note d'évaluation globale.

Il est à rappeler que ces notes sont établies selon une échelle allant de 0 à 3 : une note supérieure à 2,5 signifie que la solution d'intégration est excellente, une note supérieure à 2 que l'intégration est bonne, une note voisine de 1,5 que l'intégration est de qualité moyenne, en dessous de 1,5 une mauvaise intégration, et en dessous de 1 une intégration médiocre.

5.5.2.1 Evaluation de l'intégration dans le mur en maçonnerie type III

Les résultats de l'application de SISBat sur la proposition d'intégration dans le mur en maçonnerie type III sont présentés dans la figure suivante [Figure 5-8]. L'analyse montre que l'intégration dans le mur en maçonnerie type III est globalement bonne (n_G=2,271), voire excellente selon les sur-critères : procédé constructif, procédé d'installation, adaptabilité, esthétique, durabilité et déconstruction (les n_{Ci} étant supérieurs à 2,5).

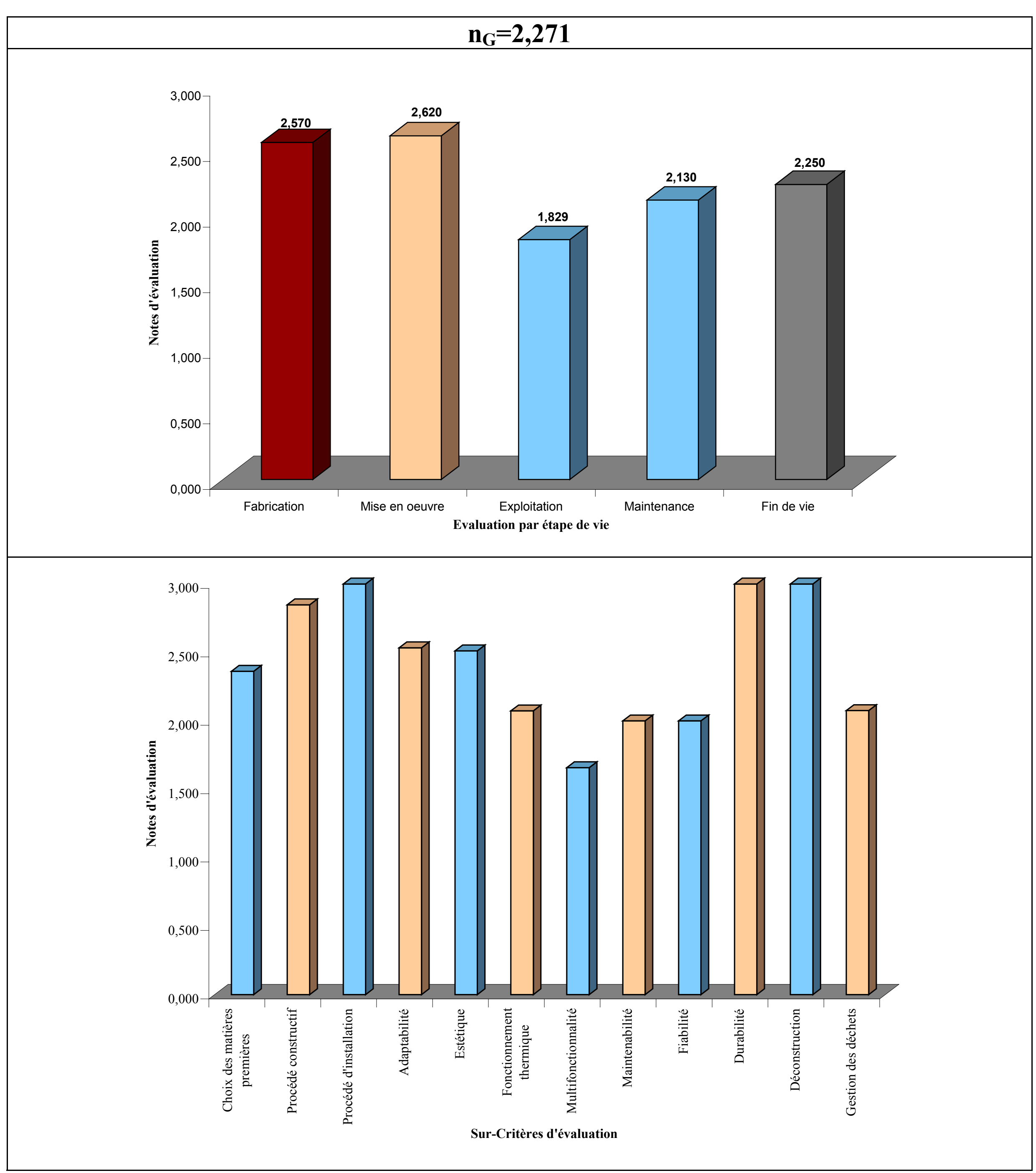


Figure 5-8 : Ensembles des notes d'évaluation d'intégration du mur en maçonnerie type III.

Toutefois, il semble que l'intégration des capteurs puisse être perfectionnée à travers les sur-critères qui sont évalués comme moyennement satisfaisants: le fonctionnement thermique, la multifonctionnalité, la maintenabilité et la fiabilité (les n_{Ci} étant inférieures ou proches de 2).

5.5.2.2 Evaluation de l'intégration dans le bardage en acier simple

L'application de SISBat sur la proposition d'intégration dans le bardage en acier simple donne un bon résultat avec une note globale relativement haute de 2,234 [Figure 5-9]. A l'instar de la proposition d'intégration précédente, la proposition d'intégration dans le bardage d'acier

simple présente une excellente note pour le procédé constructif, le procédé d'installation, la durabilité et la déconstruction (n_{Ci}>2,5).

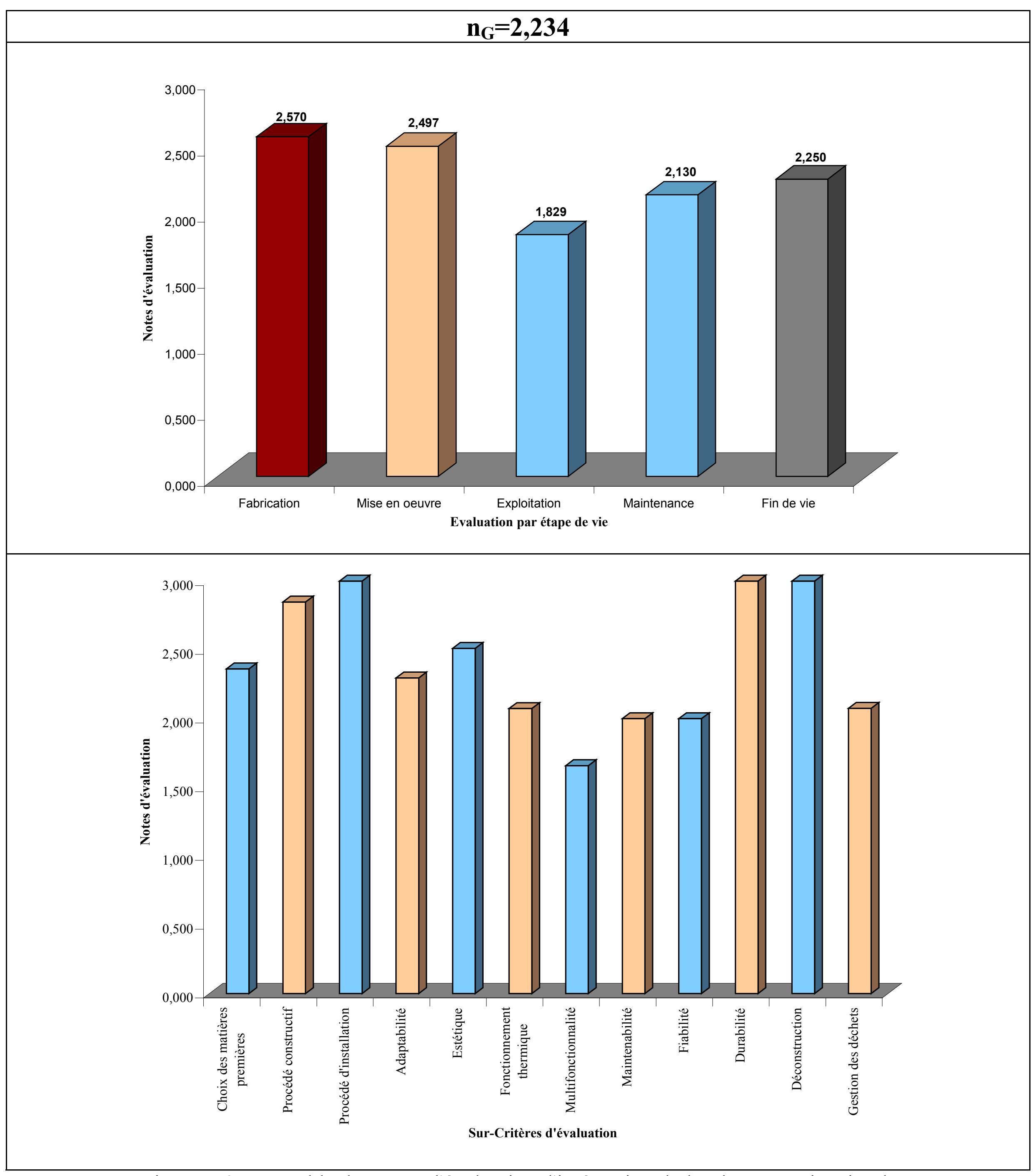


Figure 5-9: Ensemble des notes d'évaluation d'intégration du bardage en acier simple.

Certains sur-critères présentent des notes moyennes et peuvent être améliorés. Dans cette catégorie, nous trouvons le fonctionnement thermique, la multifonctionnalité, la maintenabilité et la fiabilité, dont les notes d'évaluation sont proches ou inférieures à 2. Ainsi, seule la note de l'exploitation (dépendante des sur-critères ayant des notes faibles) est inférieure aux notes des autres étapes, toutes supérieures à 2.

5.5.2.3 Evaluation de l'intégration dans l'allège d'une fenêtre

Les résultats de l'application de SISBat sur la proposition d'intégration dans l'allège de fenêtre d'une façade légère sont présentés dans la figure suivante [Figure 5-10].

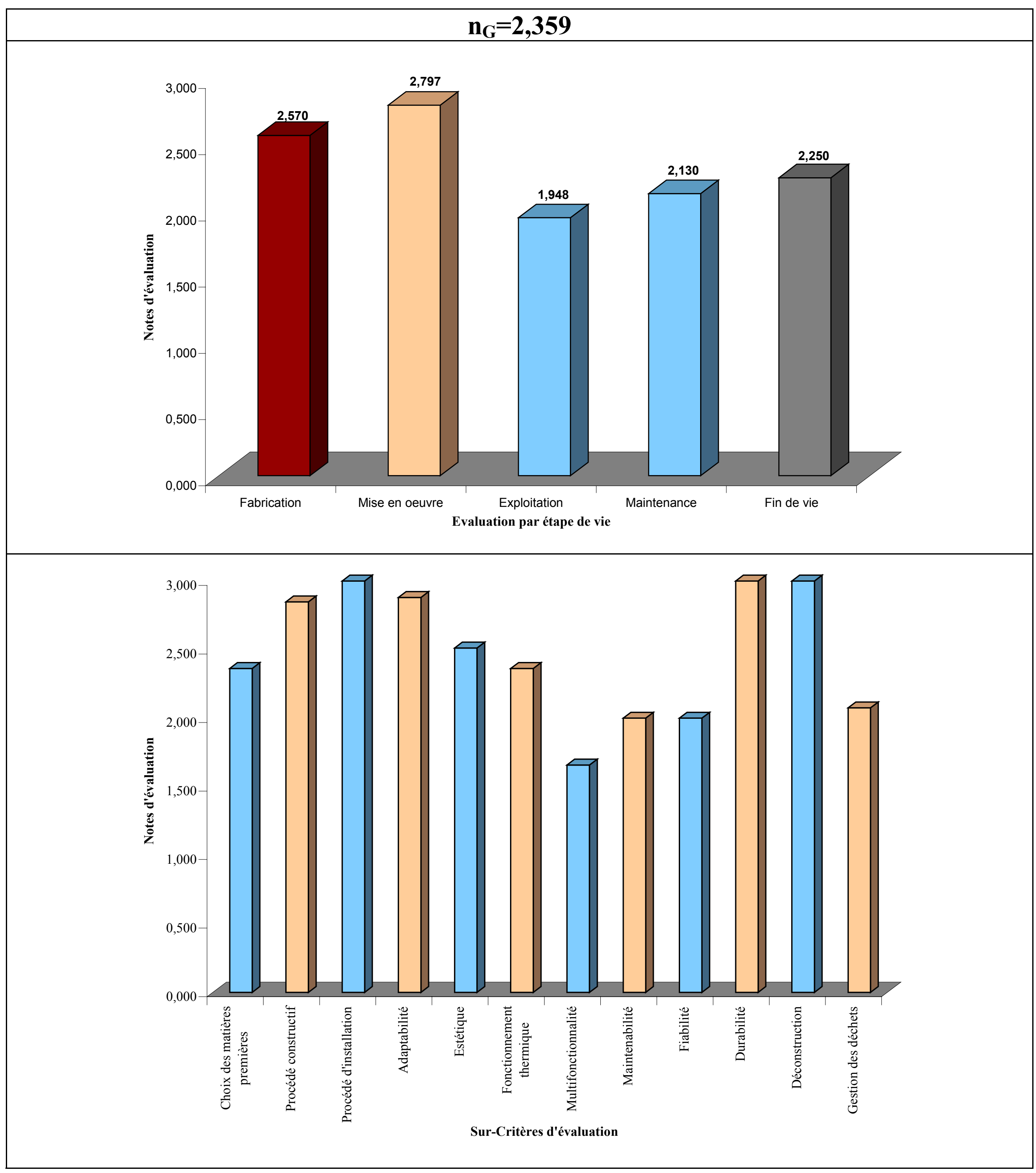


Figure 5-10 : Ensemble notes d'évaluation d'intégration de l'allège.

Les note d'évaluation globale de l'intégration solaire dans le bâtiment traduite par cette proposition signifie que la solution d'intégration est globalement bonne (n_G=2,359). En obtenant des notes d'évaluation n_{Ci} supérieurs à 2,5 la solution intégration semble être excellente selon le sur-critère procédé constructif, le procédé d'installation, l'adaptabilité, le fonctionnement thermique, la durabilité et la déconstruction. En revanche, l'amélioration

globale de cette proposition pourra être envisagée en essayant de trouver les bonnes modifications aux critères de la multifonctionnalité, de la maintenabilité et de la fiabilité ; les notes correspondantes étant égales ou inférieures à 2.

5.5.2.4 Evaluation de l'intégration dans la façade rideau

Les résultats de l'application de SISBat sur la proposition d'intégration dans les façades rideaux sont présentés dans la figure suivante [Figure 5-11].

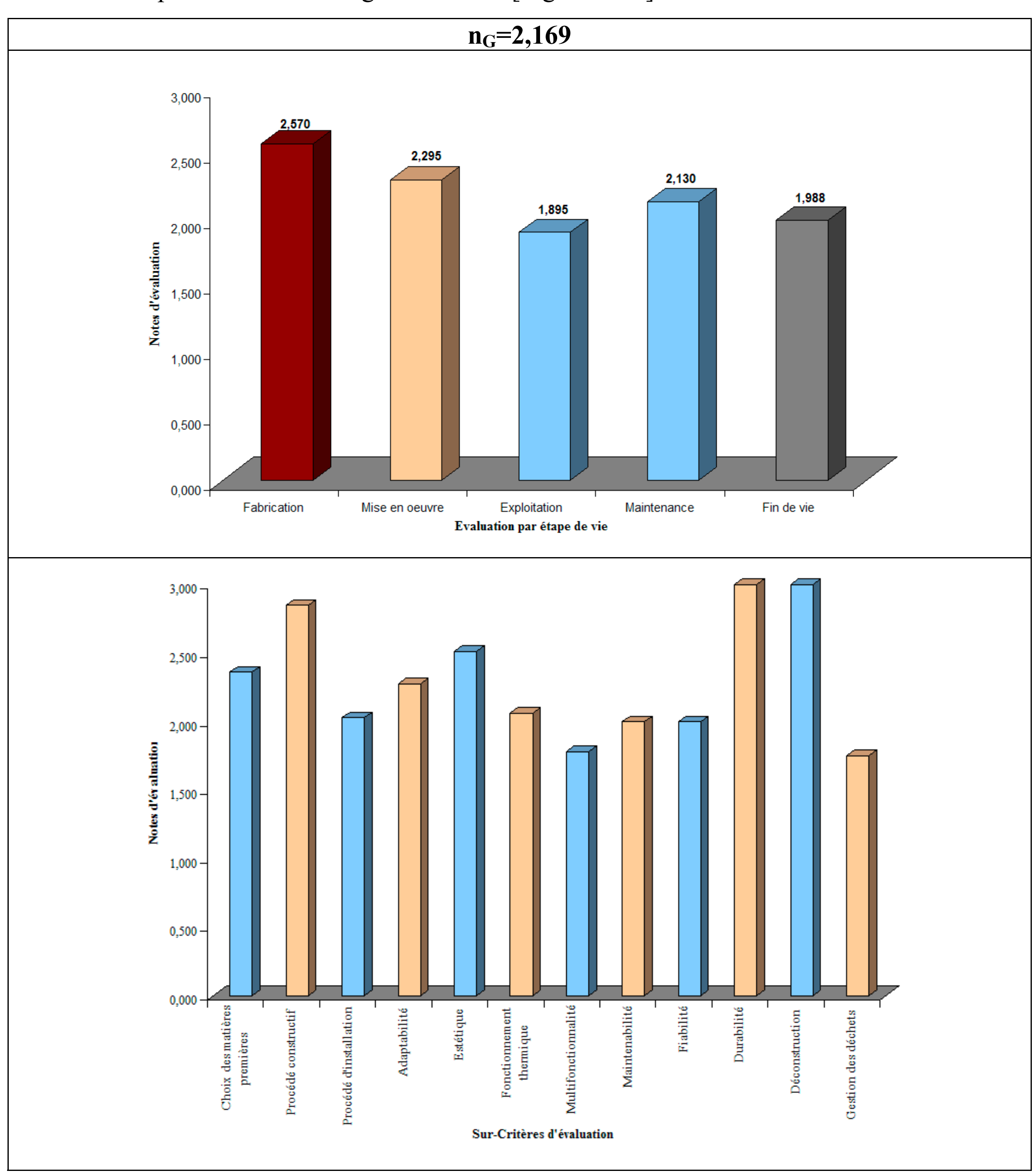


Figure 5-11 : Ensemble des notes d'évaluation d'intégration dans la façade rideau.

Le bon résultat s'explique par le fait que huit des douze sur-critères se voient affecter une note supérieure à 2. Toutefois, il semblerait que cette proposition puisse être perfectionnée sur un

certain nombre de sur-critères, surtout la multifonctionnalité ($n_{multifonctionnalité}$=1,780) et la gestion des déchets ($n_{gestion\ des\ déchets}$=1,752).

5.5.2.5 Evaluation de l'intégration dans la façade panneau en maçonnerie

La proposition d'intégration dans la façade panneau en maçonnerie est qualifiée comme bonne puisque le résultat global affiche une note d'évaluation de 2,095, ce qui est tout à fait satisfaisant [Figure 5-12].

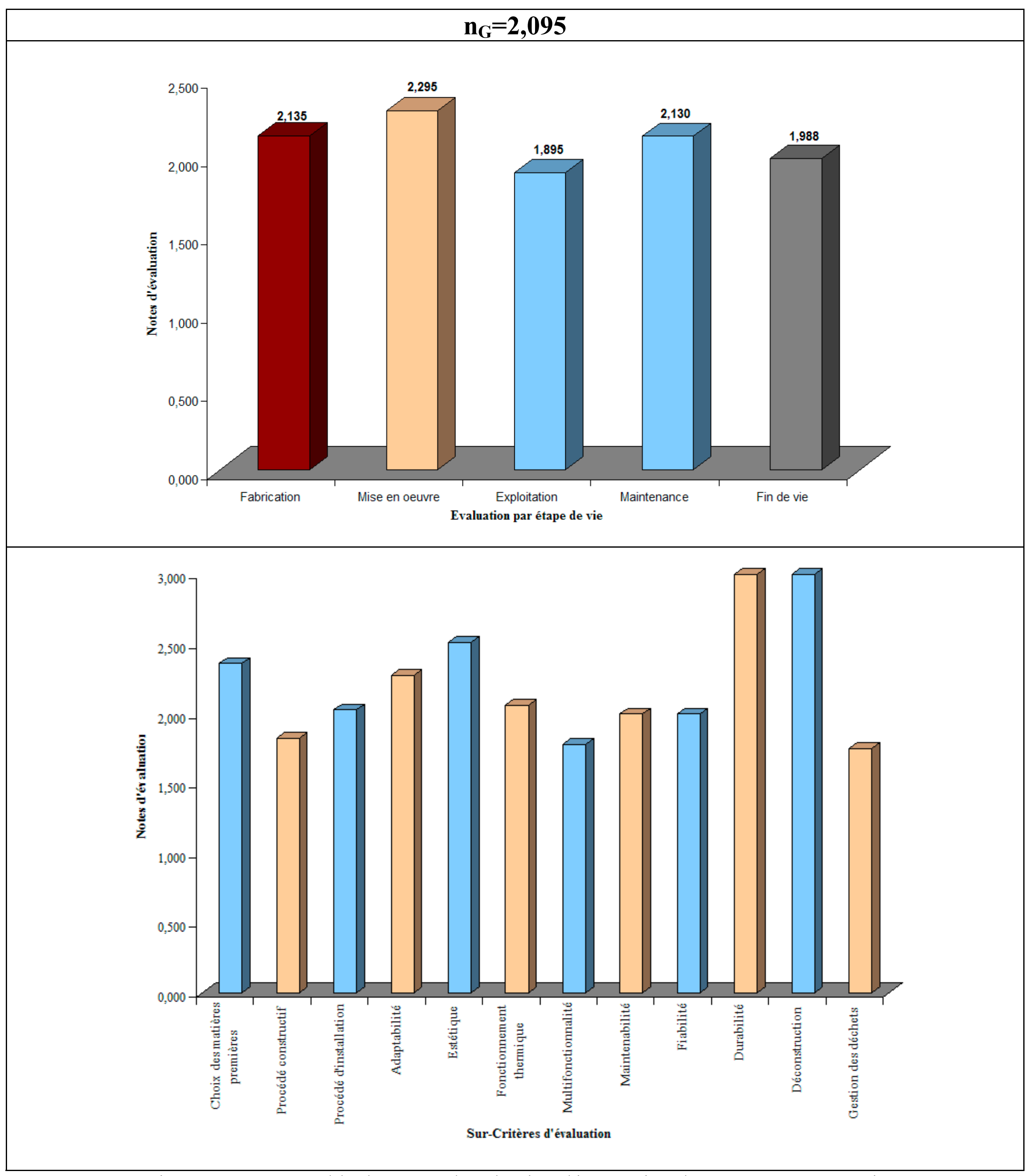


Figure 5-12 : Ensemble des notes d'évaluation d'intégration du panneau maçonnerie.

L'intégration dans la façade rideau est globalement bonne (n_G=2,095), voire excellente selon les sur-critères : l'esthétique, la durabilité et la déconstruction (les n_{Ci} étant supérieurs à 2,5). Afin d'améliorer cette proposition, nous devons proposer des modifications qui concernent les sur-critères ayant les notes faibles, qui sont le procédé constructif, la multifonctionnalité et la gestion des déchets (les $n_{Ci} \leq 2$).

5.5.2.6 Evaluation de l'intégration dans la façade à vitrage parclosé

Les résultats de l'application de SISBat sur la proposition d'intégration dans la façade à vitrage parclosé sont présentés dans la figure suivante [Figure 5-13].

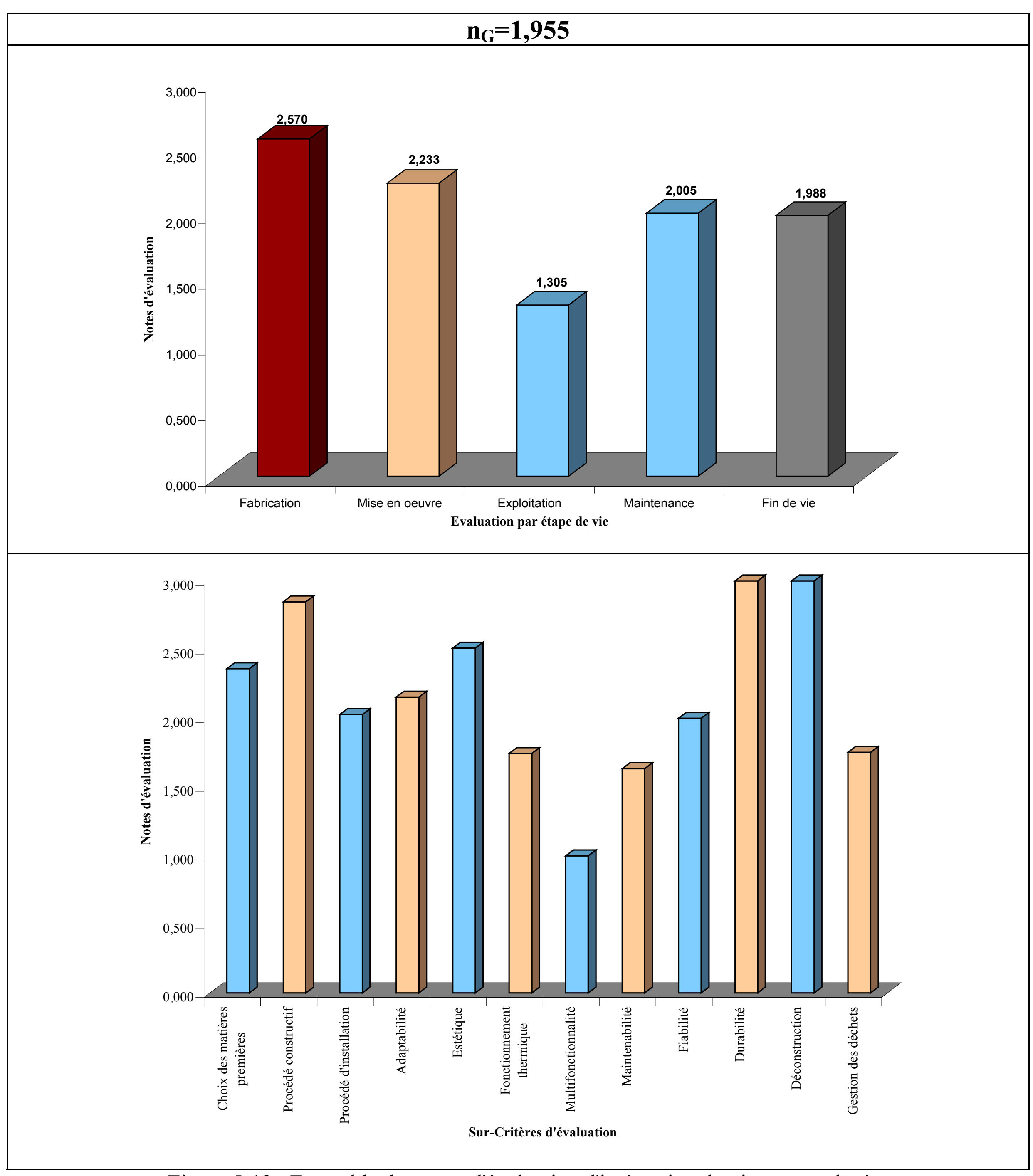


Figure 5-13 : Ensemble des notes d'évaluation d'intégration du vitrage parclosé.

L'évaluation de cette proposition d'intégration montre que sa qualité globale est moyenne (note globale égale à 1,955). En effet, elle présente quelques défaillances par rapport aux solutions précédentes, surtout au niveau des trois sur-critères : fonctionnement thermique ($n_{fonctionnement\ thermique}$= 1,744), la multifonctionnalité ($n_{multifonctionnalité}$=0,998) et la maintenabilité ($n_{maintenabilité}$=1,633).

5.5.3 Propositions d'amélioration des conceptions d'intégration

Les résultats obtenus par l'application de SISBat aux six propositions d'intégration nous ont aidé à distinguer les points faibles et forts de chaque conception. En se basant sur les critères essentiels moteurs de la grille d'analyse, mis en évidence à partir des classements direct et indirect des critères par la méthode MICMAC, nous essayons d'apporter des améliorations quant à la qualité globale d'intégration, pour chacune des propositions d'intégration étudiées.

Critère	**Sur-critère**	**Description**
L'optimisation du positionnement	Adaptabilité	Forte motricité, faible dépendance
La simplicité de l'ouvrage	Fiabilité	Forte motricité, faible dépendance
La facilité installation	Procédé d'installation	Forte motricité, faible dépendance
La fonction structurelle	Multifonctionnalité	Forte motricité, faible dépendance
La fonction isolation thermique	Multifonctionnalité	Forte motricité, faible dépendance
La modulation du système solaire	Esthétique	Forte motricité, faible dépendance
La limitation des pertes	Fonctionnement thermique	Motricité moyenne, faible dépendance
La séparabilité des matériaux	Gestion des déchets	Motricité moyenne, faible dépendance
La sécurité d'usage	Multifonctionnalité	Motricité moyenne, faible dépendance
La performance matériaux	Choix des matières premières	Motricité moyenne, faible dépendance
L'optimisation de la configuration	Fonctionnement thermique	Motricité moyenne, faible dépendance
La faisabilité technique	Procédé constructif	Motricité moyenne, faible dépendance
la visibilité du système solaire	Esthétique	Motricité moyenne, faible dépendance
Le coût de l'installation	Procédé d'installation	Dépendance moyenne, faible motricité
La facilité d'intervention	Maintenabilité	Dépendance moyenne, faible motricité
L'acceptation des usagers	Esthétique	Forte dépendance, faible motricité

Tableau 5-7 : Les critères essentiels de l'analyse d'intégration solaire.

Pour améliorer globalement la solution d'intégration proposée, nous devons donc surtout améliorer les critères essentiels moteurs faibles, par une modification de la conception d'origine pour qu'elle réponde aux exigences requises par les critères en cause. Les modifications proposées devront être bien choisies afin de ne pas altérer les autres critères de la grille. Par exemple, les deux critères clés moteurs, la fonction d'isolation thermique et la performance des matériaux, seront optimisés si l'isolant minéral est remplacé par un isolant sous vide. En effet, un isolant sous vide est beaucoup plus performant et plus léger qu'un isolant minéral. Mais par contre il est trop cher, et son utilisation aura un impact direct sur le coût de l'installation, critère essentiel très dépendant. Donc de telles solutions ne sont pas les plus performantes, et nous conseillons pour l'instant de les éviter.

Notre objectif essentiel dans la suite étant de montrer comment se servir de la méthode pour améliorer les conceptions d'origine, nous allons proposer des modifications simples basées sur des critères essentiels faibles. Les modifications entraîneront des changements dans les notes de remplissage des grilles et nous obtiendrons alors de nouvelles notes d'évaluation, comme nous le verrons plus tard.

5.5.3.1 Amélioration de l'intégration dans le mur en maçonnerie de type III

L'évaluation de la solution d'origine montre que l'intégration est globalement bonne et satisfaisante. Afin de trouver une solution encore meilleure, un travail de réflexion et de conception doit être fait sur les critères ayant des notes faibles, surtout ceux qui sont des variables essentielles du système, afin de proposer des améliorations à la solution d'origine. Celles-ci pourront être proposées en effectuant des modifications concernant les deux critères essentiels : « la sécurité d'usage » et « l'optimisation de la configuration ».

En effet, la sécurité d'usage fait partie de la multifonctionnalité qui est évaluée comme un sur-critère moyen avec une note de 1,65. Ce critère pourra être amélioré en tenant compte de la sécurité par rapport à l'extérieur. Ceci pourra être fait en imposant une hauteur minimale de sécurité d'un étage vis-à-vis des passants. De même, l'optimisation de la configuration pourra être envisagée en ajoutant des stores extérieurs, devant le capteur, dans le but de limiter l'impact de l'effet de stagnation du capteur sur sa durée de vie et sa performance [Figure 5-14].

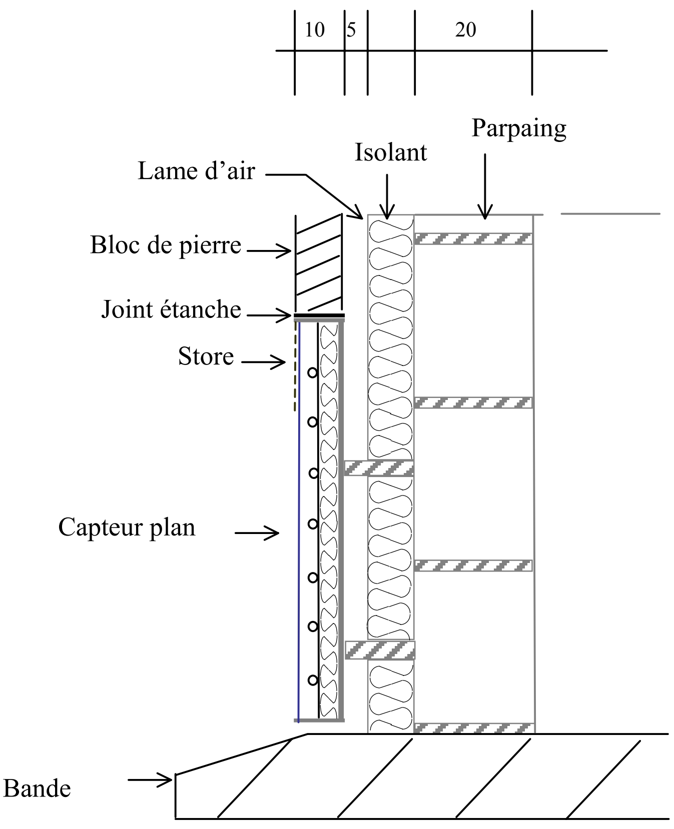


Figure 5-14 : Proposition finale pour le mur maçonnerie de type III.

5.5.3.2 Amélioration de l'intégration dans l'allège de fenêtre

Même si l'évaluation a montré que la qualité d'intégration de capteur dans l'allège de fenêtre, est globalement bonne et satisfaisante, elle pourra être améliorée par modification de la « multifonctionnalité » ($n_{multifonctionnalité}$=1,658), en ajoutant des dispositifs nécessaires à la sécurité des usagers qui peuvent accéder à l'allège depuis la fenêtre. Nous pourrons ainsi soit intégrer un dispositif en rebord filaire ou en caillebotis, soit en recommandant une disposition du capteur plus bas dans l'allège [Figure 5-15].

Toutefois, ce dispositif risque de modifier légèrement la « performance thermique » du capteur, en créant une petite zone d'ombrage ou en diminuant la surface de captage pour avoir une distance de sécurité. Quant à l'aspect « esthétique » de cette solution, il est toujours respecté.

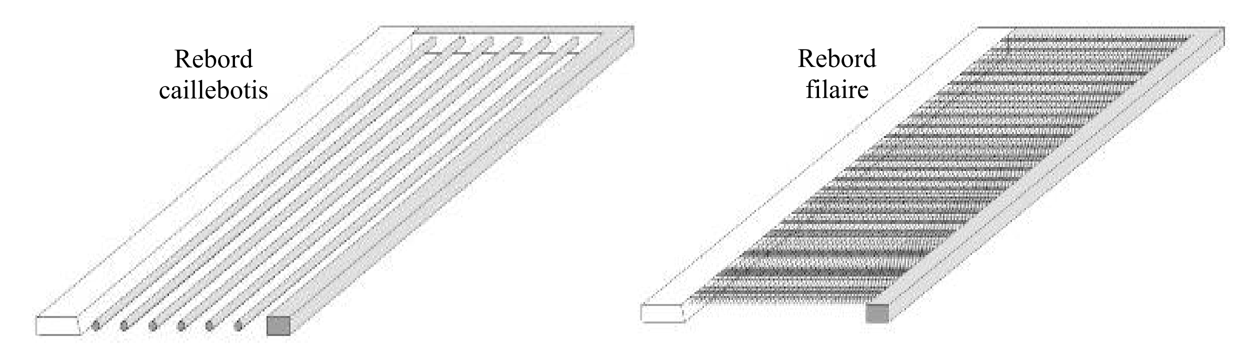


Figure 5-15 : Proposition de dispositifs de sécurité en allège.

La proposition finale incluant le dispositif de sécurité pourra prendre la forme suivante [Figure 5-16]:

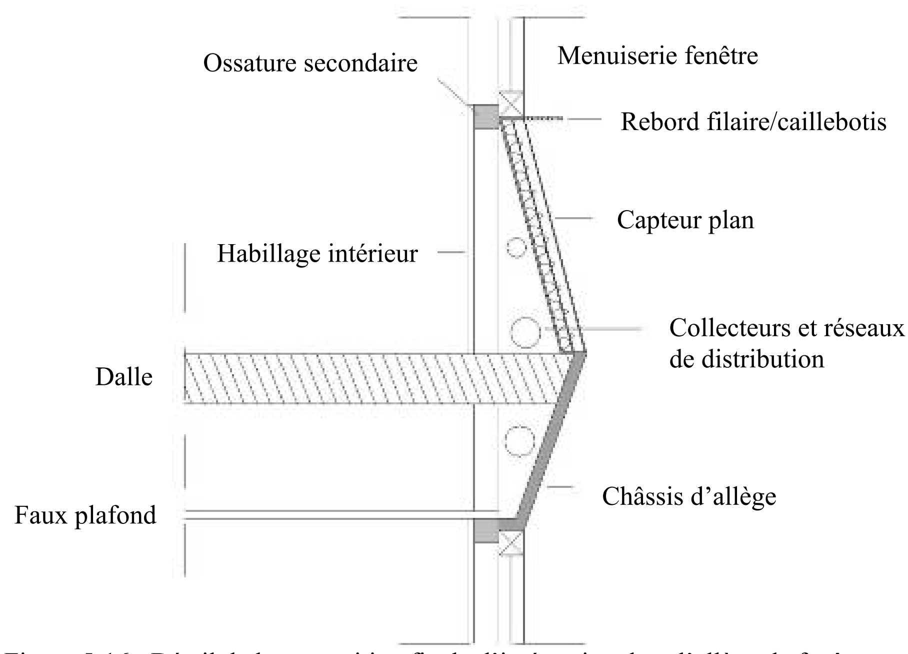


Figure 5-16 : Détail de la proposition finale d'intégration dans l'allège de fenêtre.

5.5.3.3 Amélioration de l'intégration dans la façade panneau en maçonnerie

Si le panneau comprend une fenêtre nous pouvons améliorer la « sécurité » par rapport aux usagers qui peuvent accéder à l'allège, soit en intégrant un rebord filaire ou caillebotis soit en disposant le capteur plus bas dans l'allège [Figure 5-17].

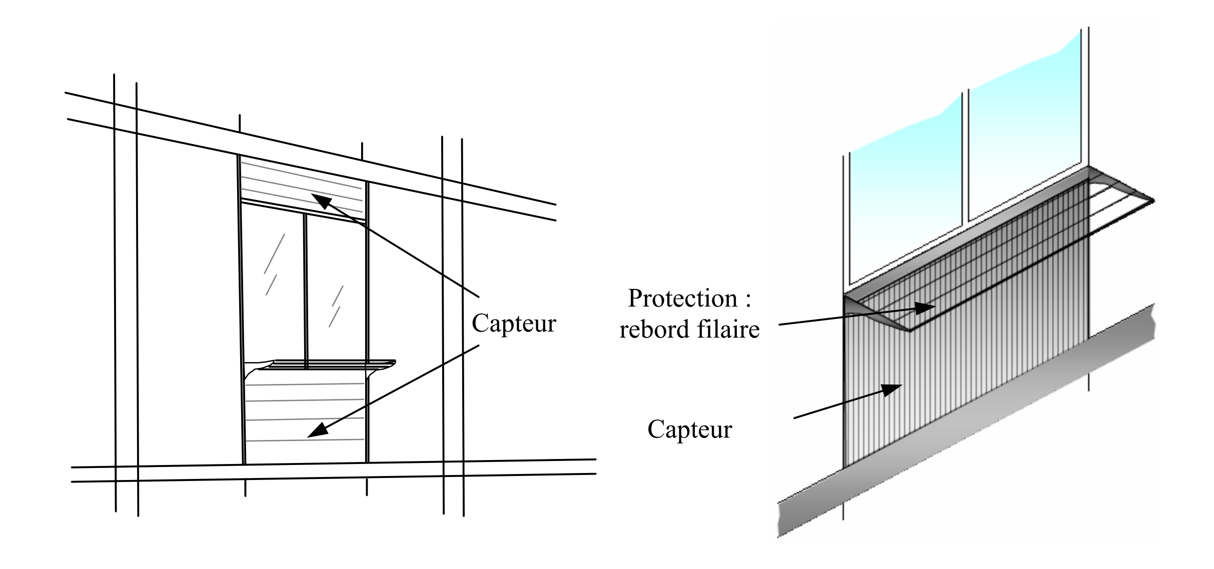


Figure 5-17 : intégration dans la façade panneau avec protection en rebord filaire.

De plus il doit y avoir une distance minimale de 50 cm de sécurité autour des fenêtres qui peuvent border les capteurs.
Cette modification respecte l'aspect « esthétique » du module. La transparence ajoutée par des fenêtres aura un impact positif sur l'acceptation de cette solution. Par contre, les mesures prises pour améliorer la sécurité risquent de modifier légèrement la « performance thermique » en jouant le rôle de masque sur une partie de la surface du captage.

5.5.3.4 Amélioration de l'intégration dans la façade rideau

Comme pour les trois propositions précédentes, nous proposons quelques modifications qui pourront augmenter la qualité de l'intégration dans la façade rideau.
L'amélioration de la « facilité d'installation » rencontre une certaine difficulté due à l'obligation d'installer depuis l'extérieur ; c'est un problème inhérent au principe constructif. La « possibilité d'utilisation en réhabilitation » est aussi difficile puisque l'épaisseur d'un panneau capteur est supérieure à un panneau normal, ce qui rend l'intégration complexe. Il faudrait donc créer un panneau capteur ayant une épaisseur minimale faible.
Si le panneau comprend une fenêtre nous devons améliorer la « sécurité » par rapport aux usagers qui peuvent accéder à l'allège, soit en intégrant un rebord filaire ou caillebotis soit en disposant le capteur plus bas dans l'allège. De plus il doit y avoir une distance minimale de 50 cm de sécurité autour des fenêtres qui peuvent border les capteurs [Figure 5-18].

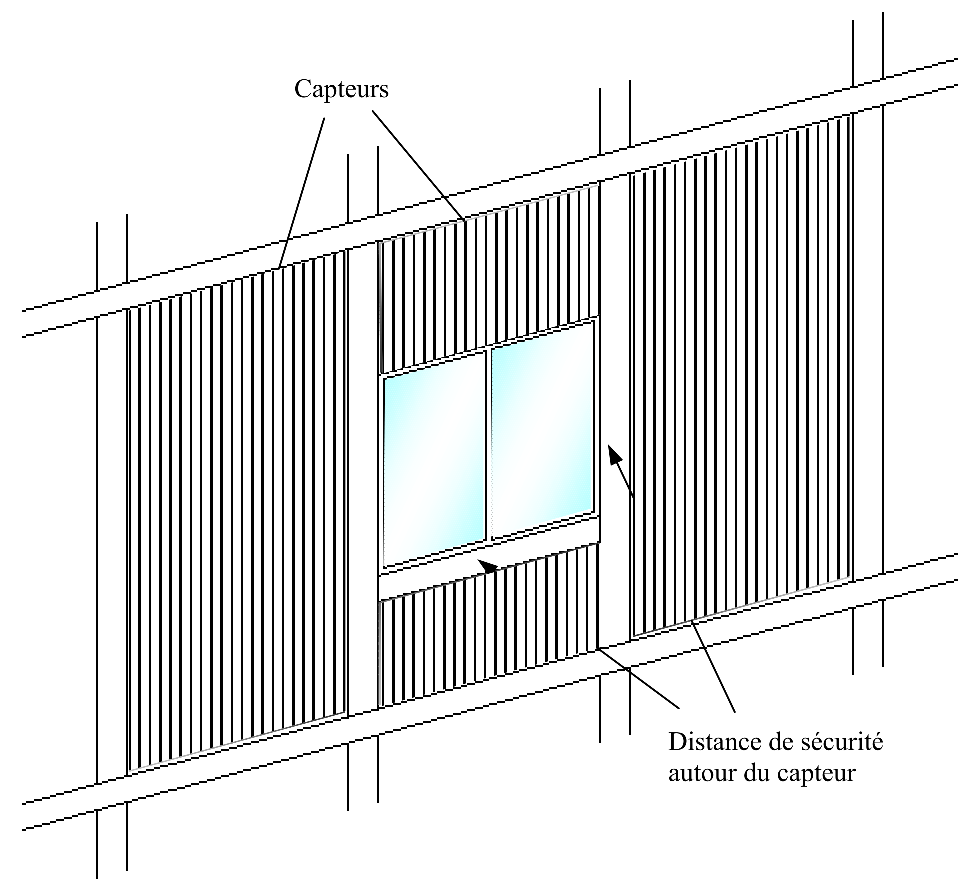


Figure 5-18 : Proposition d'intégration dans la façade rideau avec distance de sécurité.

Le panneau comprenant à la fois une partie transparente (fenêtre) et une partie opaque (capteur), se voit donc mieux accepté dans la construction, une fonction lumineuse lui est ajoutée.

5.5.3.5 Amélioration de l'intégration dans le bardage en acier simple

L'évaluation de la proposition d'origine a montré une bonne satisfaction quant à la qualité d'intégration. Si nous voulons l'optimiser, nous devrons traiter les faiblesses que présentent les sur-critères « fonctionnement thermique », « multifonctionnalité », « maintenabilité » et « fiabilité », dont les notes d'évaluation ont été proches ou inférieures à 2. Mais pour plus d'efficacité, nous nous intéressons aux critères clés qui appartiennent aux familles des sur-critères en jeu. Par exemple, le critère « sécurité d'usage » est une variable essentielle qui appartient au sur-critère « multifonctionnalité ». Donc une amélioration de ce critère devra avoir un impact positif important sur l'évaluation finale de la solution d'intégration étudiée. Ainsi, nous proposons ainsi de perfectionner « la sécurité d'usage » en améliorant la sécurité par rapport à l'extérieur en imposant une hauteur minimale de sécurité d'un étage vis-à-vis des passants.

Nous proposons aussi d'améliorer l'« optimisation de la configuration », en ajoutant des stores extérieurs, devant le capteur, dans le but de limiter l'impact de l'effet de stagnation et

aussi améliorer le « confort thermique » en limitant les grandes différences entre la température de l'absorbeur et la température à l'intérieur du bâtiment [Figure 5-19].

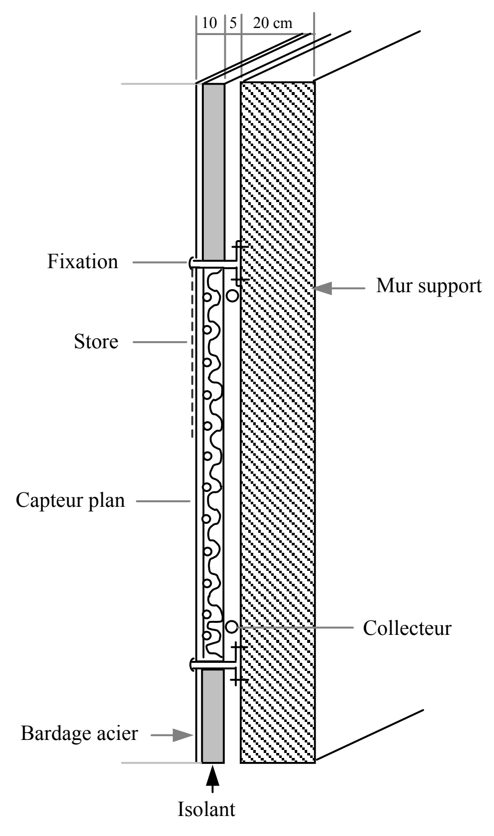


Figure 5-19 : Proposition finale pour le bardage acier.

5.5.3.6 Amélioration de l'intégration dans la façade à vitrage parclosé

La « multifonctionnalité », sur-critère présentant une défaillance avec une note d'évaluation faible de 0,998, pourra être améliorée avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant thermique. En effet, dans un capteur solaire thermique plan traditionnel, celle-ci varie entre 30 mm et 60 mm, mais ce dernier ne fait pas partie de l'enveloppe de bâtiment et ne joue pas la fonction d'isolant thermique du bâtiment. Mais dans notre proposition, nous devons être attentifs à l'interaction capteur/bâtiment et de son impact sur l'ambiance interne. Ainsi un isolant thermique plus large ou plus performant pourrait améliorer la « fonction d'isolation thermique », qui est un critère clé très moteur. Ceci augmentera aussi la fonction de « sécurité d'usage », car en améliorant l'isolation thermique, nous éliminerons la possibilité d'une montée dangereuse de la température de surface arrière du module de captage solaire, accessible aux occupants. En plus, ceci augmentera le « confort thermique » de la zone derrière le capteur, critère moyennement moteur, appartenant au sur-critère « fonctionnement thermique » ayant une faible note d'évaluation de 1,744. La note globale d'évaluation devra alors dépasser le seuil de la note 2.

En outre, une meilleure « visibilité » et une plus grande « acceptation » de cette proposition peuvent être atteintes en proposant des modules ayant des absorbeurs colorés, ou en intégrant une partie vitrée transparente [Figure 5-20].

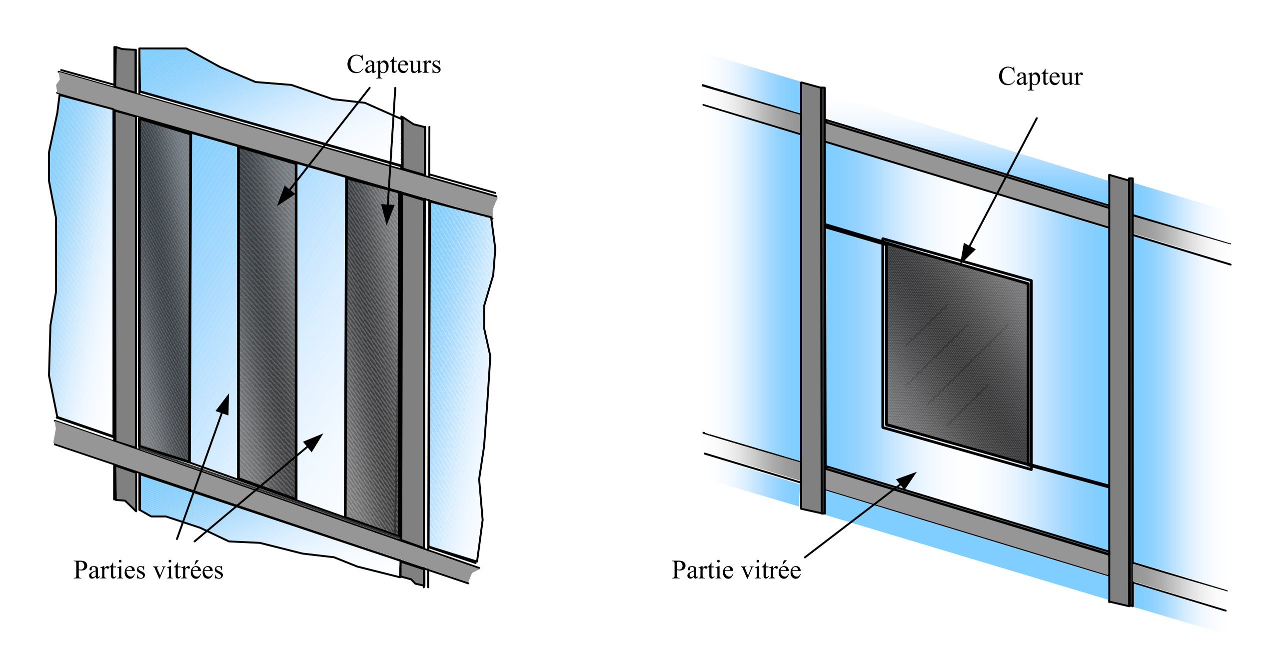


Figure 5-20 : Exemples d'intégration de la transparence dans les capteurs des façades à vitrage parclosé.

Notons que la couleur de l’absorbeur doit être d’une teinte sombre pour ne pas trop pénaliser la performance thermique du capteur. La proposition finale pourra être représentée dans la figure suivante [Figure 5-21].

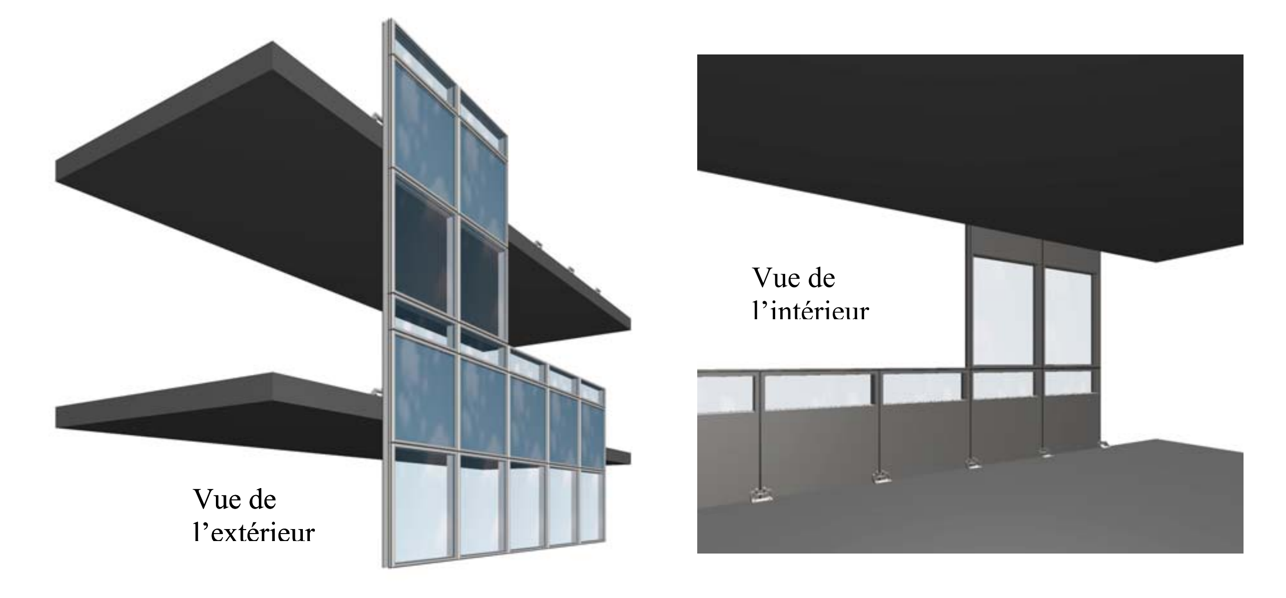


Figure 5-21 : Proposition finale d'intégration de capteurs dans les façades à vitrage parclosé.

5.6 Évaluation finale

Les améliorations apportées dans les paragraphes précédents, aux différents principes constructifs conduisent à une modification de notation de certains critères de la grille d'analyse. Les nouvelles notations des six propositions améliorées sont regroupées dans le tableau suivant [Tableau 5-8]:

Critères/ Notes	**Mur en maçonnerie de type III**	**Bardage acier simple**	**Allège de fenêtre**	**Façade panneau maçonnerie**	**Façade rideau**	**Vitrage parclosé**
1- Performance des matériaux	2	2	2	2	2	2
2- Faisabilité technique	3	3	3	1	3	3
3- Possibilité d'industrialisation	3	3	3	3	3	3
4- Facilité d'installation	3	3	3	2	2	2
5- Optimisation du positionnement	2	2	3	2	2	2
6- Adéquation en terme d'espace	3	3	3	3	3	3
7- Adéquation en terme d'usage	3	3	3	3	3	3
8- Installation en réhabilitation	3	3	3	2	2	2
9- Adéquation en terme de poids	3	1	2	2	2	1
10-Visibilité	2	2	2	**3**	**3**	**3**
11-Modulation	3	3	3	3	3	3
12- Performance thermique	2	2	**2**	**1**	**1**	2
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	2	2	2	2	2
14- Optimisation de la configuration	**2**	**2**	2	1	1	0
15- Limitation des pertes	3	3	3	3	3	3
16- Fonction acoustique	3	3	3	2	2	**2**
17- Fonction isolation thermique	3	3	3	3	3	**3**
18- Fonction structurelle	0	0	0	1	1	0
19- Sécurité d'usage	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**
20- Limitation des interventions	2	2	2	2	2	2
21- Sécurité d'intervention	2	2	2	2	2	1
22- Facilité d'intervention	2	2	2	2	2	2
23- Simplicité	2	2	2	2	2	2
24- Résistance	2	2	2	2	2	2
25- Durée de vie	3	3	3	3	3	3
26- Facilité de déconstruction	3	3	3	3	3	3
27- Séparabilité des matériaux	2	2	2	2	2	2
28- Disponibilité des matériaux	3	3	3	3	3	3
29- Coût des matériaux	3	3	3	3	3	3
30- Impact env. des matériaux	1	1	1	1	1	1
31- Coût de la fabrication	2	2	2	2	2	2
32- Impact env. de la fabrication	3	3	3	3	3	3
33- Coût de l'installation	3	3	3	2	2	2
34- Impact env. de l'installation	3	3	3	3	3	3
35- Acceptation	2	2	2	**3**	**3**	**3**
36- Confort thermique	2	**3**	1	1	1	**2**
37- Coût de l'exploitation	3	3	3	3	3	3
38- Impact env. de l'exploitation	3	3	3	3	3	2

Critères/ Notes	Mur en maçonnerie de type III	Bardage acier simple	Allège de fenêtre	Façade panneau maçonnerie	Façade rideau	Vitrage parclosé
39- Coût de la déconstruction	3	3	3	3	3	3
40- Impact env. de la déconstruction	3	3	3	3	3	3
41- Convertibilité des composants	3	3	3	2	2	2
42- Convertibilité de l'emplacement	3	3	3	2	2	2
43- Coût des traitements	1	1	1	1	1	1

Tableau 5-8 : Nouvelle notation n_{ck} des six solutions d'intégration.

L'application de SISBat sur les six propositions d'intégration modifiées est ensuite faite avec les nouvelles notations. Les résultats des nouvelles et des anciennes notes globales d'évaluation sont regroupés dans un seul graphique afin de voir l'évolution de la proposition après avoir fait les modifications proposées, et qui laisse faire la comparaison entre les différentes propositions en même temps [Figure 5-22].

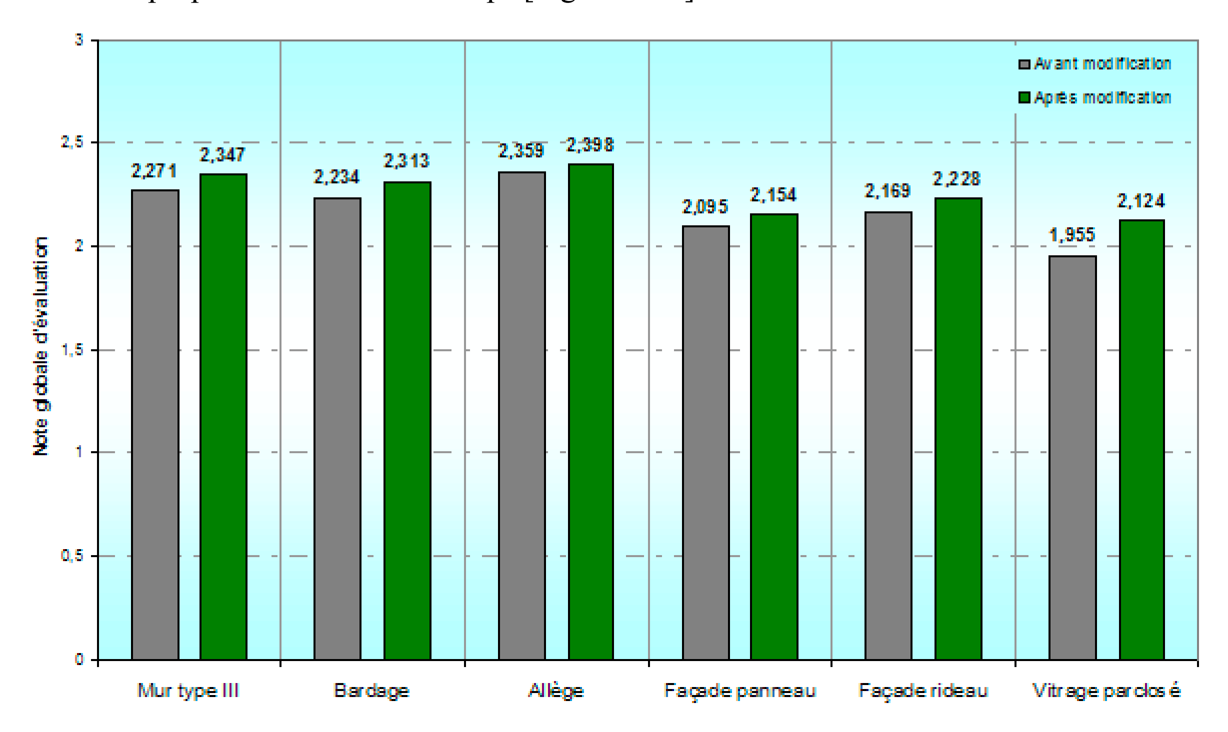


Figure 5-22 : Proposition finale d'intégration de capteurs dans les façades à vitrage parclosé.

Les critères essentiels sur lesquels les améliorations sont faites ont permis d'augmenter les notes de manière significative (gain de 2% pour l'allège, jusqu'à 9% pour la façade à vitrage parclosé).

Toutes les notes obtenues sont comprises entre 2 et 2,5, ceci signifie que l'intégration pour chacune des propositions est tout à fait acceptable. Il est important de rappeler ici que l'étude que nous avons menée concerne des propositions d'intégration dans les façades des bâtiments, afin d'analyser des propositions pour les différents types de bâtiment, ce qui explique la redondance de certaines notes attribuées dans la grille d'analyse. Pour un bâtiment, la

comparaison avec des conceptions d'intégration dans les autres parties de l'enveloppe, devrait être plus décisive dans le choix de la solution la plus appropriée.

La solution façade vitrage parclosé précédemment notée en dessous de 2, passe dans la catégorie supérieure. Cela est dû à la réduction de l'impact de l'interaction capteur/bâtiment en augmentant l'épaisseur de l'isolant, et en intégrant la transparence dans le module final permettant ainsi d'augmenter la note de la sécurité, du confort et de l'acceptation.

La meilleure note revient toujours à l'allège qui offre un bien meilleur rendement grâce à son inclinaison.

5.7 Conclusion

La méthode développée SISBat répond à une problématique de prospective environnementale, économique et technico-architecturale de l'intégration solaire. En effet, nous avons élaboré une grille d'analyse selon la démarche systémique. Nous avons identifié les interrelations entre les différents critères de la grille. Ensuite, avec l'analyse structurelle, nous avons obtenu un outil qui permet une exploitation suffisante des solutions d'intégration solaire dans le bâtiment et donne une visualisation de la trajectoire possible de la vie de l'élément s'il sera fabriqué, mis en œuvre, et exploité jusqu'à la fin de sa vie et son éventuelle déconstruction.

La méthode a permis ensuite de bâtir et de modifier six propositions d'intégration. Les résultats obtenus montrent que l'objectif de la méthode SISBat, qui consiste à apporter des réponses pour la conception et l'évaluation de l'intégration des capteurs solaires dans le bâtiment, en absence de méthodes semblables, est atteint.

Même si la méthode prospective d'évaluation multicritère SISBat se révèle importante pour la conception, le design et l'optimisation des solutions d'intégration solaire dans le bâtiment, elle ne peut pas donner des réponses quant à la quantité d'énergie utile qui sera produite par le système solaire installé ou de quantifier l'impact de l'intégration sur la variation de température de l'ambiance interne ; des données nécessaire pour l'installation de tels éléments dans des bâtiments réels. C'est pourquoi notre méthode d'évaluation sera complétée dans la partie suivante par une modélisation numérique générale des capteurs intégrés dans l'enveloppe du bâtiment.

Bien qu'il soit bien entendu possible d'étudier la performance thermique des six solutions évaluées, nous limiterons notre étude à la proposition d'intégration dans la façade à vitrage parclosé. En effet, comme nous le verrons dans la dernière partie, un prototype de cette solution est réalisé et des mesures expérimentales sont faites sur site réel. Les résultats des mesures expérimentales serviront à étudier le comportement réel d'un tel produit.

Partie III
Modélisation dynamique et expérimentation de capteurs intégrés

Chapitre 6 :
Modélisation dynamique de systèmes solaires thermiques intégrés

6 Modélisation dynamique de systèmes solaires thermiques intégrés

À ce stade, une méthode de conception et d'évaluation de l'intégration a été développée. Cette méthode représente pour un concepteur ou un architecte un outil de conception de propositions d'intégration du solaire thermique dans le bâtiment, et d'évaluation de la qualité de cette proposition suivant une analyse prospective multicritère. Mais, à partir de ce point, nous aurons besoin d'étudier le rendement énergétique du système solaire composé en partie par des composants intégrés dans le bâtiment, et d'étudier l'impact que pourront avoir ces composants sur l'ambiance interne du bâtiment.

A l'heure actuelle, la plupart des modèles des systèmes solaires ne traitent pas la problématique d'intégration, et considèrent que les composants solaires sont dissociés du bâtiment, même si ceux-ci sont intégrés. Nous avons donc besoin de développer un modèle dynamique de système solaire avec des composants intégrés dans le bâtiment. Mais la modélisation de chaque composant du système solaire varie suivant la fonction solaire que devra assurer le composant modélisé. En effet, le développement d'un modèle de capteur intégré dans l'enveloppe n'est pas semblable au développement d'un modèle de stockage intégré dans la structure du bâtiment.

Dans la partie précédente, nous avons analysé des propositions d'intégration des éléments de captage solaires plans dans l'enveloppe du bâtiment. Donc, nous choisissons de développer un modèle de capteur à circulation d'eau intégré dans l'enveloppe du bâtiment afin de pouvoir analyser nos propositions. Ce choix est justifié par le fait que ce type de capteurs trouve son application dans la plupart des systèmes solaires qui couvrent la majorité des besoins énergétiques, surtout la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage des locaux (plancher chauffant), et même le rafraîchissement solaire (par roue dessiccante).
La démarche suivie est de développer un code permettant de simuler des capteurs solaires thermiques intégrés dans l'enveloppe du bâtiment, et de construire un modèle global regroupant un système solaire pour la production d'eau chaude sanitaire avec un modèle de bâtiment. En considérant ensuite l'intégration dans la façade à vitrage parclosé comme application, un protocole de simulation est défini, et une série de simulations est effectuée par la suite afin d'évaluer la performance thermique des composants solaires conçus et son impact sur la température intérieure du bâtiment.

6.1 La modélisation de capteurs solaires intégrés

Pour développer un modèle numérique de capteurs solaires intégrés dans l'enveloppe du bâtiment, afin d'effectuer le travail de simulation numérique du système solaire thermique, nous devons utiliser les équations de base de la thermodynamique.

La démarche suivie est semblable à celle de l'analyse d'Hottel-Whillier-Bliss, menée sur des capteurs solaires thermiques plans vitrés indépendants du bâtiment [DUFFIE J., 1980] [KREIDER J. F., 1981].

Dans notre analyse, nous intégrons la température de l'ambiance intérieure du bâtiment comme paramètre et nous développons les équations de performances du capteur sous leurs nouvelles formes.

6.1.1 Bilan énergétique du capteur

Nous analysons en détail le bilan thermique d'un capteur plan vitré intégré dans l'enveloppe du bâtiment (en façade ou en toiture) tel qu'illustré par la figure suivante [Figure 6-1].

L'analyse qui suit s'applique aussi bien aux capteurs plans intégrés dans les façades qu'aux capteurs intégrés dans les toitures, aux capteurs à circulation de liquide caloporteur qu'aux capteurs à air.

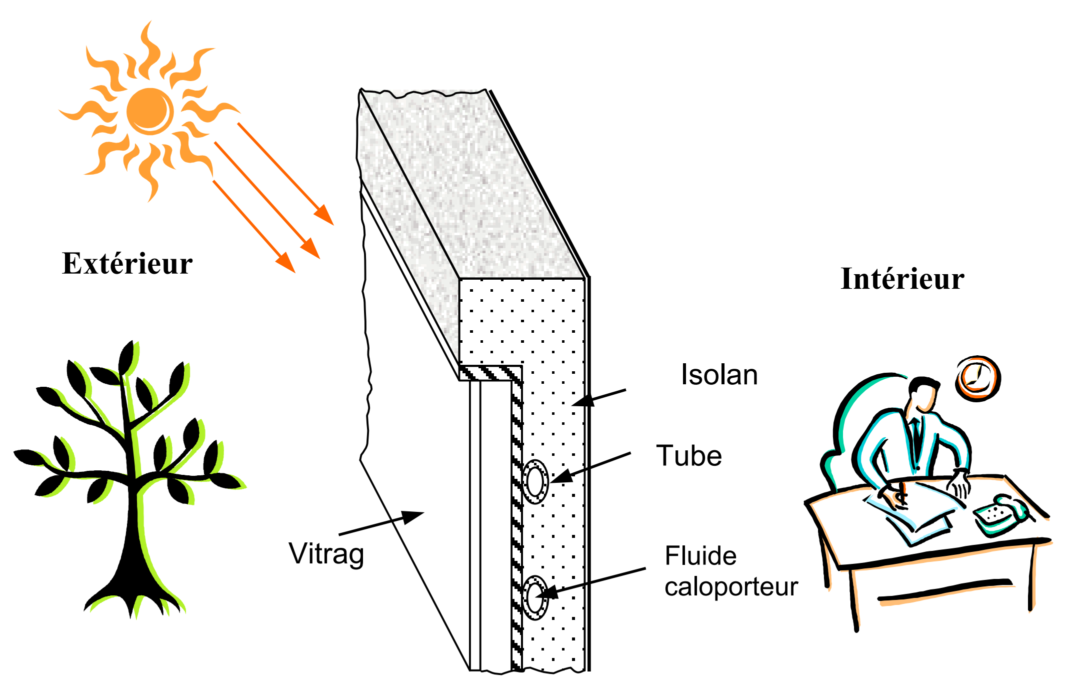


Figure 6-1 : Schéma d'un capteur solaire plan vitré intégré dans l'enveloppe du bâtiment.

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur peut se traduire sous la forme suivante :

$$Q_u = I_a - Q_p - \frac{de_c}{dt}$$ Équation 6-1

avec Q_u la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur ;

Q_p la puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur ;

de_c/dt la puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable ;

I_a le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur.

Le flux solaire global incident sur la surface extérieure du capteur, à un instant donné, s'exprime en fonction du flux absorbé à la surface de l'absorbeur par :

$$I_a = I_c \frac{\tau\alpha_a}{1-\rho_d(1-\alpha_a)}$$ Équation 6-2

où I_c désigne le flux solaire incident sur la surface du capteur ;
τ le facteur de transmission du vitrage au rayonnement solaire ;
ρ_d le coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage ;
α_a le coefficient d'absorption de l'absorbeur pour les longueurs d'onde λ correspondant au rayonnement solaire.

Le rendement instantané d'un absorbeur s'écrit :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_a}$$ Équation 6-3

Dans la suite, nous étudierons d'abord le cas de régime thermique permanent, (dec/dt)=0. Dans ce cas, l'expression du rendement devient :

$$\eta = 1 - \frac{Q_p}{I_a}$$ Équation 6-4

Cette simple relation montre que dans la conception d'un capteur, on aura toujours intérêt à :

- Diminuer les pertes Q_p du capteur ;
- Augmenter la puissance absorbée Ia.

Le rendement optique du capteur est défini par :

$$\eta_o = \frac{I_a}{I_c}$$ Équation 6-5

6.1.2 La conductance thermique du capteur intégré

Dans le but d'obtenir une compréhension des paramètres déterminant l'efficacité thermique du capteur, il est important de développer le concept de conductance thermique. Nous étudions ici le cas d'un capteur intégré dans l'enveloppe du bâtiment, donc la face arrière du capteur est en contact avec l'environnement intérieur du bâtiment.

Connaissant la température moyenne Tc de l'absorbeur, le second terme de droite de l'Équation 6-1 peut être écrit en première approximation :

$$Q_p = U_a(T_c - T_a) + U_b(T_c - T_b)$$ Équation 6-6

Avec T_a désigne la température d'ambiance extérieure devant le capteur ;
T_b la température d'ambiance interne derrière le capteur ;
U_a la conductivité thermique de la partie avant du capteur intégré ;
U_b la conductivité thermique de la partie arrière du capteur intégré.

La simplicité de l'Équation 6-6 est trompeuse, car la conductance thermique ne peut pas être spécifiée sans analyse détaillée de toutes les pertes thermiques. La visualisation des flux thermiques dans le capteur est illustrée par l'analogie électrique [Figure 6-2]:

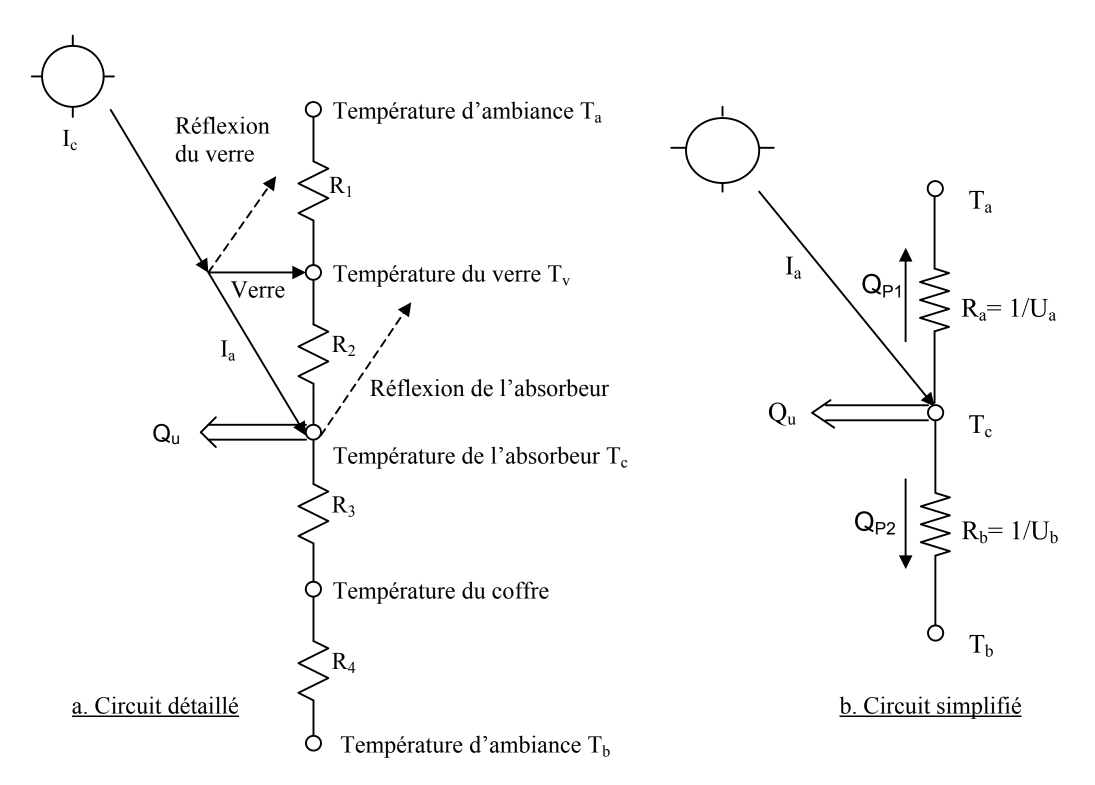


Figure 6-2 : Circuit thermique pour un capteur plan vitré intégré dans le bâtiment.

- R1 désigne la résistance thermique au flux par convection et rayonnement entre la face extérieure du vitrage et l'air ambiant,
- R2 la résistance thermique au flux par convection et rayonnement entre la face intérieure du vitrage et l'absorbeur,
- R3 la résistance thermique au flux par conduction à travers la face arrière et la face latérale de l'absorbeur,
- R4 la résistance thermique au flux par convection avec l'environnement derrière le capteur.

La température est considérée homogène pour chaque élément.

Pour simplifier, nous pouvons écrire :

$$U_a = \frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_1 + R_2}$$
$$U_b = \frac{1}{R_b} = \frac{1}{R_3 + R_4}$$ Équation 6-7

Nous divisons les pertes en deux parties :

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2}$$ Équation 6-8

où Q_{p1} signifie perte vers l'avant ;
Q_{p2} perte vers l'arrière.

Q_{p1} peut être déterminée en déterminant les résistances thermiques R1 et R2.

Entre le vitrage et l'absorbeur, la chaleur est transférée par convection et radiation, ainsi :

$$\left(Q_{p1}\right)_2 = h_{c2}\left(T_c - T_v\right) + \frac{\sigma\left(T_c^4 - T_v^4\right)}{1/\varepsilon_{c,i} + 1/\varepsilon_{v,i} - 1}$$ Équation 6-9

où h_{c2} le coefficient d'échange par convection entre le vitre et l'absorbeur ;

$\varepsilon_{c,i}$ le coefficient d'émission correspondant au rayonnement infrarouge de l'absorbeur ;

$\varepsilon_{v,i}$ le coefficient d'émission correspondant au rayonnement infrarouge du vitre.

Le second terme de cette équation pourra être linéarisé et s'exprime ainsi :

$$\left(Q_{p1}\right)_2 = \left(h_{c2} + h_{r2}\right)\left(T_c - T_v\right) \qquad \text{Équation 6-10}$$

où $h_{r2} = \dfrac{\sigma\left(T_c + T_v\right)\left(T_c^2 + T_v^2\right)}{1/\varepsilon_{c,i} + 1/\varepsilon_{v,i} - 1}$; h_{r2} étant le coefficient d'échange par rayonnement entre le vitre et l'absorbeur.

Entre l'air ambiant et le vitrage, la chaleur est transférée par convection et radiation, ainsi :

$$\left(Q_{p1}\right)_1 = \left(h_{c1} + h_{r1}\right)\left(T_v - T_a\right) \qquad \text{Équation 6-11}$$

où $$h_{r1} = \varepsilon_{v,i}\sigma\left(T_v + T_{ciel}\right)\left(T_v^2 + T_{ciel}^2\right)\left[\frac{\left(T_v - T_{ciel}\right)}{\left(T_v - T_a\right)}\right]$$

h_{r1} et h_{c1} désignent respectivement les coefficients d'échange par rayonnement et par convection entre le vitrage et l'environnement extérieur. T_v représente la température du vitre, T_a la température de l'air ambiant et T_{ciel} la température de rayonnement du ciel. $\varepsilon_{v,i}$ est le coefficient d'émission correspondant au rayonnement infrarouge du vitrage.

Q_{p2} est difficile à calculer pour la plupart des capteurs. En général, pour un capteur bien conçu, les pertes en arrière sont faibles et n'ont pas besoin d'être calculées avec précision. Si l'isolation autour des bords est de même épaisseur qu'en arrière, les pertes thermiques peuvent être estimées en assumant une conduction unidimensionnelle autour du périmètre du capteur, mais en ajoutant une constante pour la partie latérale.

Dans les capteurs bien isolés la résistance thermique extérieure R_4 est négligée face à la résistance thermique de l'isolant R_3.

Ainsi les pertes thermiques vers l'arrière s'expriment par :

$$Q_{p2} = \frac{\lambda_i}{e_i}\left[1 + \frac{\left(2e_l + e_i\right)\left(l_1 + l_2\right)}{l_1 l_2}\right]\left(T_c - T_b\right) \qquad \text{Équation 6-12}$$

où λ_i le facteur de conduction de l'isolant ;

e_i désigne l'épaisseur de l'isolant sur la face arrière ;

e_l l'épaisseur de l'isolant sur les faces latérales ;

l_1 la longueur du capteur ;

l_2 la largeur du capteur ;

T_c la température moyenne de l'absorbeur ;

T_b la température de l'ambiance intérieure, derrière le capteur.

Comme R_1 et R_2 sont fonctions de la température du vitrage T_v, le calcul des pertes doit se faire par itérations successives. Il s'agit en fait d'un système de trois équations (Équation

6-11, Équation 6-10 et Équation 6-12) à trois inconnues T_v, Q_{p1} et Q_{p2}. La solution d'un tel système non linéaire peut se faire par itérations successives.

6.1.3 Analyse thermique de l'absorbeur

Afin de déterminer l'efficacité du capteur, le taux de transfert thermique au fluide caloporteur doit être calculé. Pour cela, nous considérons une section de la plaque absorbante comme présentée dans la figure suivante [Figure 6-3].

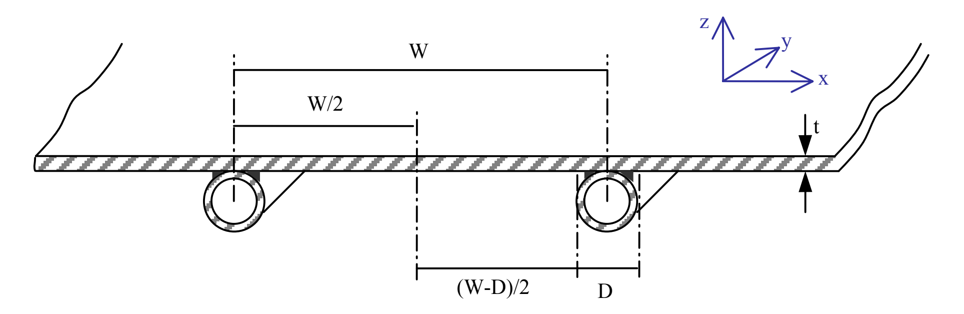


Figure 6-3 : Schéma montrant les coordonnées et les dimensions de l'absorbeur.

En considérant que la conduction dans la direction de l'axe y est négligeable, le bilan thermique par unité de surface à une distance y_0 est :

$$I_a.\Delta x + U_a.\Delta x.(T_a - T) + U_b.\Delta x.(T_b - T) + \left(-k.t.\frac{dT}{dx}\right)_x - \left(-k.t.\frac{dT}{dx}\right)_{x+\Delta x} = 0 \qquad \text{Équation 6-13}$$

Avec t : épaisseur de la plaque absorbante ;

T : température moyenne de la section de la plaque absorbante ;

k : conductivité thermique l'absorbeur.

En considérant que l'épaisseur de la plaque est uniforme et que la conductivité thermique de la plaque est indépendante de la température, l'Équation 6-13 peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle du second ordre:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_a + U_b}{k.t}\left(T - \frac{U_a.T_a + U_b.T_b}{U_a + U_b} - \frac{I_a}{U_a + U_b}\right) \qquad \text{Équation 6-14}$$

Les conditions aux limites pour ce système à une distance y_0 sont :

1. Au centre entre 2 tubes le flux thermique est nul : x=0, $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = 0$;
2. Au dessus du tube, la température de l'ailette est $T_{base}(y_0)$, or pour x= $\left(\frac{W-D}{2}\right)$,

   $T(x= (W-D)/2)= T_{base}$.

Si nous considérons que $m^2 = \frac{U_a + U_b}{k.t}$ et $\psi = T - \frac{U_a.T_a + U_b.T_b}{U_a + U_b} - \frac{I_a}{U_a + U_b}$, alors l'Équation 6-14 devient :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - m^2.\psi = 0 \qquad \text{Équation 6-15}$$

La solution générale de cette équation différentielle est donnée par :

$$\psi = C_1.\sinh(m.x) + C_2 \sinh(mx)$$ Équation 6-16

Les constantes C1 et C2 peuvent être déterminées par solution de l'Équation 6-16 avec les deux conditions limites. Nous obtenons ainsi :

$$\frac{T - \frac{I_a + U_a.T_a + U_b.T_b}{U_a + U_b}}{T_{base} - \frac{I_a + U_a.T_a + U_b.T_b}{U_a + U_b}} = \frac{\cosh(m.x)}{\cosh\left(m.\frac{W-D}{2}\right)}$$ Équation 6-17

De l'équation précédente, le taux de transfert de chaleur d'une demi-ailette de l'absorbeur au tube de conduit peut être déterminé en évaluant le gradient de température à la base de l'ailette, or $q'_{demi-ailette} = -\left(k.t\frac{dt}{dx}\right)_{x=\frac{W-D}{2}}$, alors :

$$q'_{demi-ailette} = \left(I_a + U_a.T_a + U_b.T_b - (U_a + U_b)T_{base}\right) \times \left(\frac{\tanh\left(m.\frac{W-D}{2}\right)}{m}\right)$$ Équation 6-18

Et puisqu'un tube de conduction est généralement soudé à l'ailette des deux côtés, alors le taux total de transfert thermique se traduit par l'équation :

$$q'_{ailette} = F(W-D)\left(I_a - (U_a + U_b)T_{base} + U_a.T_a + U_b.T_b\right)$$ Équation 6-19

où F est le rendement de l'ailette :

$$F = \frac{\tanh\left(m.\frac{W-D}{2}\right)}{m.\frac{W-D}{2}}$$ Équation 6-20

Pour le transfert de la portion de la plaque en contact direct avec le tube, le transfert s'exprime par :

$$q'_{tube} = D\left(I_a - (U_a + U_b)T_{base} + U_a.T_a + U_b.T_b\right)$$ Équation 6-21

Donc le taux de transfert total par unité de longueur dans la direction de l'écoulement du fluide caloporteur $(q'_u = q'_{ailette} + q'_{tube})$ s'exprime par :

$$q'_u = \left[(W-D)F + D\right]\left(I_a - (U_a + U_b)T_{base} + U_a.T_a + U_b.T_b\right)$$ Équation 6-22

L'absorbeur doit transférer sa chaleur au fluide caloporteur dans le tube de conduit. Le taux de transfert au fluide caloporteur peut être exprimé sous la forme :

$$q'_u = \frac{T_{base} - T_f}{\frac{1}{h_{fi}.\pi.D_i} + \frac{1}{C_b}}$$ Équation 6-23

Avec D_i diamètre interne du tube ;

h_{fi} coefficient d'échange par convection entre le tube de conduit el le fluide ;

C_b la conductance thermique de la soudure.

En remplaçant T_{base} de l'Équation 6-23 dans l'Équation 6-22 nous obtenons :

$$q'_u = W \times F' \times \left(I_a - \left(U_a + U_b \right) T_{base} + U_a . T_a + U_b . T_b \right)$$ Équation 6-24

Où F' est le facteur de rendement du capteur :

$$F' = \frac{\dfrac{1}{U_a + U_b}}{W \left[\dfrac{1}{\left(U_a + U_b \right) \left(\left(W - D \right) F + D \right)} + \dfrac{1}{C_b} + \dfrac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]}$$ Équation 6-25

En général, la conduction de la soudure est très grande, et peut donc être négligée. Ainsi, 1/Cb≈0.

Le facteur de rendement du capteur F' augmente lorsque l'épaisseur de l'absorbeur et la conductivité thermique de l'absorbeur augmentent. Par contre, F' diminue lorsque la distance W entre deux tubes de conduit augmente. En plus, si le transfert thermique entre le tube de conduit et le fluide caloporteur augmente, mais une augmentation de la conductance thermique en avant U_a et/ou en arrière U_b du capteur causera une diminution de F'.

L'Équation 6-24 détermine le taux de transfert au fluide caloporteur à un point déterminé y_0 de la plaque absorbante. Pour un capteur réel la température augmente dans la direction du fluide caloporteur. D'après la loi de conservation de l'énergie, nous pouvons écrire :

$$q'_u \left(y \right) . dy = \frac{\dot{m}}{n} c_p \times \left[T_f \left(y + dy \right) - T_f \left(y \right) \right]$$ Équation 6-26

où n nombre de tube de conduit du capteur ;

$\dot{m}$ débit massique du fluide caloporteur ;

c_p chaleur massique du fluide.

En remplaçant q'_u de l'Équation 6-24 dans l'Équation 6-26 nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$\dot{m} c_p \frac{dT_f}{dy} = -nF'W \left(U_a + U_b \right) \left[T_f \left(y \right) - \frac{I_a + U_a . T_a + U_b . T_b}{U_a + U_b} \right]$$ Équation 6-27

En intégrant l'Équation 6-27 sur la longueur du capteur L, nous obtenons :

$$\frac{T_{fo} - \dfrac{I_a + U_a . T_a + U_b . T_b}{U_a + U_b}}{T_{fi} - \dfrac{I_a + U_a . T_a + U_b . T_b}{U_a + U_b}} = \exp \left(- \frac{\left(U_a + U_b \right) A_c F'}{\dot{m} c_p} \right)$$ Équation 6-28

où T_{fo} la température du fluide à la sortie du capteur ;

T_{fi} la température du fluide à l'entrée du capteur ;

A_c surface d'entrée du capteur.

Puisqu'il est difficile de mesurer la température moyenne de la surface de la plaque absorbante T_c, comme pour le cas d'un capteur solaire non intégré, nous allons définir un facteur de conductance du capteur F_R. Il est défini comme étant le rapport de l'énergie utile reçue sur l'énergie qui serait reçue si l'absorbeur avait la même température que le fluide à l'entrée du capteur T_{fi} :

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p\left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c\left[I_a - \left(U_a + U_b\right)T_{fi} + +U_a.T_a + U_b.T_b\right]}$$ Équation 6-29

En substituant l'Équation 6-28 dans l'Équation 6-29 et en éliminant le terme T_{fo} nous obtenons l'expression finale du facteur de conductance du capteur:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_c\left(U_a + U_b\right)}\left[1 - e^{-\frac{(U_a+U_b)A_cF'}{\dot{m}c_p}}\right]$$ Équation 6-30

Ainsi, la quantité d'énergie utile fournie par le capteur, s'exprime en fonction de la température de fluide à l'entrée par :

$$q_u = A_cF_R\left[I_a - \left(U_a + U_b\right)T_{fi} + +U_a.T_a + U_b.T_b\right]$$ Équation 6-31

6.1.4 Effet du régime transitoire

Dans les conditions réelles du fonctionnement du capteur, les conditions climatiques sont transitoires. Afin d'inclure l'effet de ces données sur le comportement du capteur dans notre analyse, nous devons prendre en compte la capacité thermique du capteur. Il a été montré que l'étude de l'effet de la capacité thermique des différents éléments du capteur peut se faire avec une méthode simplifiée qui donne des résultats satisfaisants en comparaison avec une étude analytique complète [KREIDER, 1981] [SFEIR, 1981].

Dans cette approche, nous considérons que l'absorbeur, les tuyaux de conduit et l'isolation sont à la même température, et que les pertes Q_{p2} vers l'ambiance interne du bâtiment sont négligeables face aux pertes vers l'extérieur Q_{p1}. Lorsqu'il n'y a pas de circulation de fluide dans le capteur, le bilan thermique du capteur se traduit par :

$$\left(mc\right)_e \frac{dT_c}{dt} = A_c\left(I_a - U_a\left(T_c - T_a\right)\right)$$ Équation 6-32

Avec A_c : surface d'entrée du capteur ;

I_a : le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur ;

T_c : température moyenne de l'absorbeur ;

U_a : la conductivité thermique de la partie avant du capteur intégré ;

T_a : désigne la température d'ambiance extérieure devant le capteur ;

$(mc)_e$: l'inertie thermique équivalente du capteur.

En considérant que les pertes thermiques du capteur et les pertes thermiques du vitrage sont proportionnelles, il est démontré que :

$$\left(mc\right)_e = \left(mc\right)_a + \frac{Ua}{U_v}\left(mc\right)_v$$ Équation 6-33

Avec $(mc)_a$: la somme des inerties thermique de l'absorbeur, les tuyaux et l'isolant ;

$(mc)_v$: l'inertie thermique du vitrage ;

U_v : la conductivité thermique entre le vitrage et l'ambiance extérieure.

La solution de l'Équation 6-32, pour des valeurs connues de l'irradiation et de la température extérieure, permet d'évaluer la variation en température moyenne de l'absorbeur à partir d'une valeur initiale T_{c0} en fonction du temps :

$$T_c(t) = T_a + \frac{I_a}{U_a} - \left(\frac{I_a}{U_a} - T_{c0} + T_a\right)\exp\left[-\frac{U_a A_c t}{(mc)_e}\right] \qquad \text{Équation 6-34}$$

Ces équations, développées pour représenter le modèle numérique d'un capteur intégré dans l'enveloppe du bâtiment, sont ensuite traduites sous le code MATLAB et intégrées sous TRNSYS, comme nous le verrons dans la suite.

6.2 Logiciels utilisés dans la simulation

Il existe de nombreux outils informatiques qui peuvent servir à effectuer le travail de simulation numérique de systèmes solaires thermiques. Les caractéristiques nécessaires pour ce travail sont la capacité à simuler un système solaire global avec une partie bâtiment. La simulation doit être basée sur des calculs dynamiques pour appréhender les phénomènes transitoires.

6.2.1 SOLO 2000

Le modèle a été développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) dans le cadre d'une méthode de calcul de productivité de chauffes eau solaires, implémentée dans le logiciel SOLO [GUIAVARCH, 2003]. Le modèle a pour but de représenter un chauffe-eau solaire qui peut être soit un système avec un capteur et un ballon de stockage (chauffe eau à éléments séparés), soit un chauffe-eau monobloc.

Ce modèle permet de calculer la part des besoins en eau chaude F_{ecs} assurée par le système solaire, en moyenne mensuelle. Cette variable F_{ecs}, aussi appelée taux de couverture solaire en moyenne mensuelle, est déterminée selon une formule empirique qui fait intervenir :

- les paramètres du système solaire (surfaces, déperditions thermiques…) ;
- les sollicitations : ensoleillement et température extérieure, en moyenne mensuelle;
- la température d'eau chaude désirée, la température d'eau froide, et la consommation journalière d'eau chaude, le tout en moyenne mensuelle ;
- la température du local où repose le ballon de stockage.

Le taux annuel de couverture solaire $F_{ecs,an}$ est défini comme suit :

$$F_{ecs,an} = \frac{\sum_{m=1}^{12} B_{ecs}(m).F_{ecs}(m)}{\sum_{m=1}^{12} B_{ecs}(m)} \qquad \text{Équation 6-35}$$

Avec $B_{ecs}(m)$ besoins mensuels d'eau chaude sanitaire ;
$F_{ecs}(m)$ taux mensuel de couverture solaire ;
m mois considéré

La variable $F_{ecs,an}(m)$ représente en pourcentage la part des besoins en eau chaude sanitaire qui est assurée par l'appoint. Le taux mensuel de couverture solaire $F_{ecs}(m)$ est calculé selon la méthode « SOLO ».
Dans notre recherche, nous avons utilisé SOLO 2000 dans le but de dimensionner un système solaire traditionnel de production d'eau chaude qui va être comparé au système solaire avec des capteurs intégrés dans le bâtiment.

6.2.2 MATLAB 6.5

Le logiciel MATLAB pour MATtrix LABoratory, a été conçu afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable. Il est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées :

- soit directement au clavier depuis une fenêtre de commande ;
- soit sous forme de séquences d'expressions ou scripts enregistrés dans des fichiers texte appelés m-files et exécutées depuis la fenêtre de commande ;
- soit plus rarement sous forme de fichiers binaires appelés mex-files ou fichiers .mex générés à partir d'un compilateur C ou fortran.

Ce noyau est complété par une bibliothèque de fonctions prédéfinies, très souvent sous forme de fichiers m-files, et regroupés en paquetages ou toolboxes [Casadevall, 2005].
Pour toutes ces qualités, nous avons décidé d'écrire le code du modèle des capteurs solaires thermiques intégrés dans un m-file de MATLAB. L'interactivité de MATLAB nous a permis de vérifier instantanément le fonctionnement du code et de repérer les erreurs.

6.2.3 TRNSYS 16

Disponible commercialement depuis 1975, il a été conçu afin de simuler les performances en régime transitoire de système énergétiques. TRNSYS utilise une approche modulaire pour résoudre d'importants systèmes d'équations décrites par des sous-programmes Fortran contenant chacun un modèle pour un composant du système.
En créant un fichier de variables d'entrée, l'utilisateur de TRNSYS se connecte directement à un grand nombre de sous programmes afin de créer un système. Le processeur de TRNSYS appelle les composants du système avec le fichier d'entrée et évolue par itérations successives jusqu'à ce que le système d'équations soit résolu.
Contrairement à de nombreux autres programmes, TRNSYS permet aux utilisateurs de décrire complètement et de modéliser toutes les interactions entre les composants du système. Par exemple, l'utilisateur détermine les connexions entre les sorties d'une pompe et les autres parties du système. La modularité du programme autorise également d'avoir autant de pompes, de contrôleurs et de panneaux solaires que nécessaire, dans toutes les configurations ou agencements possibles. Du fait que les programmes sont écrits en Fortran, un utilisateur peut facilement générer un composant TRNSYS afin de modéliser n'importe quelle nouvelle

technologie. Le « Simulation Studio » est une interface graphique intelligente flexible et puissante pour effectuer des simulations et manipuler facilement les résultats avec TRNSYS.
Dans notre recherche, nous avons utilisé TRNSYS à cause de ses qualités et en plus parce qu'il héberge un composant qui permet une liaison dynamique avec MATLAB sous lequel est écrit notre code de capteur intégré dans l'enveloppe du bâtiment.

6.3 Le protocole de simulation

6.3.1 Les fichiers climatiques

Nous avons choisi d'utiliser la base de fichiers climatiques de METEONORM, qui est une base mondiale de données météorologiques, qui vient s'ajouter à la bibliothèque de TRNSYS 16. Nous avons ensuite effectué des simulations pour trois villes françaises représentant trois zones d'éclairement solaire différent : Paris, Lyon et Nice.
À l'échelle Européenne nous avons choisi de mener des simulations pour Stockholm, Athènes, Lisbonne et Berlin afin de pouvoir comparer des résultats représentatifs des différentes zones climatiques européennes [Figure 6-4].



Figure 6-4: Distribution des villes Européennes choisie pour l'étude.

Un fichier climatique enregistré en temps réel en 2005 par la station météorologique, installée par l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat sur le site de l'Isle d'Abeau, est aussi utilisé pour les simulations de l'étude paramétrique, du choix des couleurs et surtout pour la comparaison avec les données expérimentales, comme nous le verrons dans la dernière partie.

6.3.2 La description du système solaire

Notre choix pour la partie capteur s'est porté sur la sixième proposition évaluée dans la partie précédente : « l'intégration dans la façade à vitrage parclosé ». Ce choix s'explique par le fait que des prototypes sont ensuite fabriqués et testés sur site réel comme nous verrons dans la partie « Expérimentation ». Les caractéristiques du composant solaire intégré, utilisées dans les simulations, sont les suivantes [Tableau 6-1] :

Surface d'entrée		2,01 m²
Dimensions	Longueur Largeur	1780 mm 1130 mm
Tubes d'absorbeur Cu ∅		8 mm
Isolation		PU 130mm
Absorbeur en cuivre		0,2mm
Absorptivité et Emissivité		Selon la couleur

Tableau 6-1 : Paramètres du capteur intégré dans la façade vitrée.

Le composant de façade solaire étudié est formé par l'intégration de composants de captage dans la façade à vitrage parclosé, comme décrit dans la partie « façade à vitrage parclosé ». Un absorbeur, un isolant et un coffre sont fixés derrière le vitrage. Le composant contient aussi une partie vitrée composée par un double vitrage [Figure 6-5].

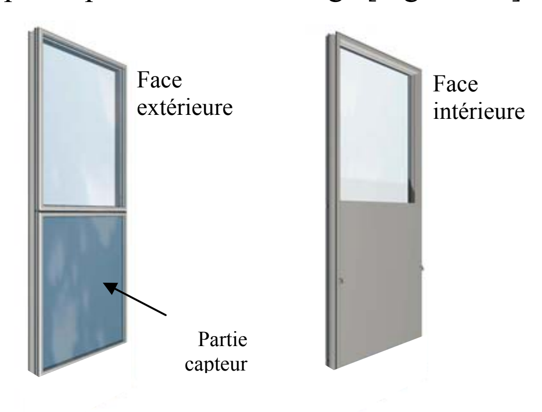


Figure 6-5 : Le module solaire intégré en façade.

La performance du composant solaire intégré sera comparée à celle d'un capteur de référence. Notre choix s'est porté sur un capteur fabriqué par l'entreprise Giordano et commercialisé sous le nom de capteurs C8 S [Figure 6-6].

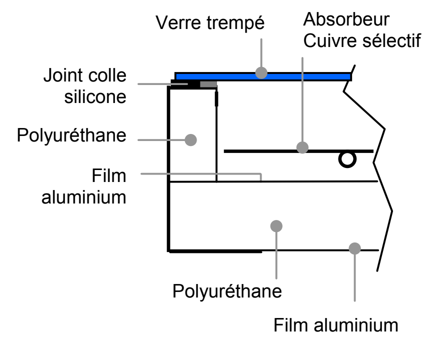


Figure 6-6 : Coupe transversal du capteur C8 S [Giordano].

Les caractéristiques de ces capteurs sont les suivantes [Tableau 6-2]:

Surface hors tout		2,10 m²
Surface d'entrée		2 m²
Dimensions	Longueur Largeur Hauteur	2000 mm 1050 mm 75 mm
Tubes d'absorbeur Cu ∅		8 mm
Isolation		PU 30mm
Facteur d'absorption		0,95
Facteur d'émission		0,09

Tableau 6-2 : Caractéristiques du capteur C8S de Giordano.

Ces capteurs traditionnels sont généralement posés en toiture terrasse d'un bâtiment, tandis que notre composant fait partie intégrante de la façade.

Le système solaire pour la production d'eau chaude formé par les capteurs C8 S est d'abord dimensionné avec SOLO 2000 afin de trouver un bon rapport entre la surface des capteurs, le volume du stockage, et les besoins, et ceci pour chaque zone climatique considérée. Les capteurs sont considérés comme ayant une configuration optimale : inclinaison 45°, orientation face au sud. Les taux de rendement annuels désirés sont proches de 60%.

Les mêmes rapports sont repris et de nouvelles simulations sont faites dans TRNSYS, cette fois pour le système de référence, et ensuite pour le système composé par les éléments solaires intégrés dans la façade, pour les différents climats du protocole, des orientations différentes (Sud, Est, Ouest), et plusieurs couleurs d'absorbeurs. Le but de ces simulations est de comparer le comportement des composants solaires intégrés dans la façade vitrée à celui des capteurs plans vitré traditionnels vendus sur le marché et installés généralement sur la toiture d'un bâtiment sans intégration du point de vue architectural [Figure 6-7].

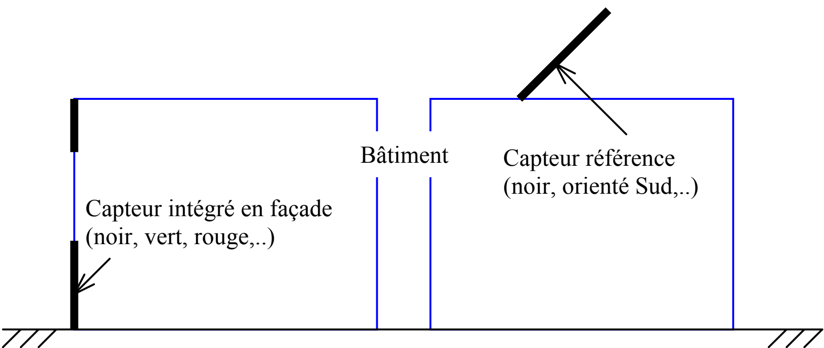


Figure 6-7 : Capteur solaire de référence et capteur intégré en façade.

6.3.3 Couleurs de l'absorbeur

La couleur couramment utilisée est le noir du fait de ses propriétés d'absorption. Mais pour des raisons architecturales, il sera préférable dans certains cas d'utiliser d'autres couleurs qui peuvent être plus en harmonie avec le bâtiment et son environnement, sans toutefois perdre beaucoup en performance énergétique. En tenant compte des facteurs d'absorption et d'émissivité, plusieurs couleurs ont été choisies pour être simulées et comparées à la couleur noire de l'absorbeur du capteur C8 S. Leurs caractéristiques sont les suivantes [Tableau 6-3] :

N°	Couleur	Code couleur	Absorptivité	Émissivité
C1		Noir chromé	α = 95,6	E = 7,7
C2		RAL[4] 7021	α = 95,0	ε = 86,0
C3		RAL 6009	α = 94,0	ε = 95,0
C4		RAL 3000	α = 55,8	ε = 85,1
C5		RAL 3007	α = 82,5	ε = 78,8
C6		RAL 3020	α = 58,1	ε = 87,7
C7		RAL 4007	α = 53,1	ε = 80,9
C8		RAL 5020	α = 61,3	ε = 71,7
C9		RAL 6002	α = 68,5	ε = 90,9
C10		RAL 6007	α = 64,6	ε = 79,9
C11		RAL 6024	α = 58,9	ε = 89,0
C12		RAL 7011	α = 57,3	ε = 73,0

Tableau 6-3 : Ensemble des couleurs d'absorbeur testées.

6.3.4 Description de la zone de bâtiment

Le volume étudié est un étage courant d'un bâtiment. Il a une forme parallélépipédique. Il est séparé en deux zones de volumes identiques par une paroi intérieure [Figure 6-8].

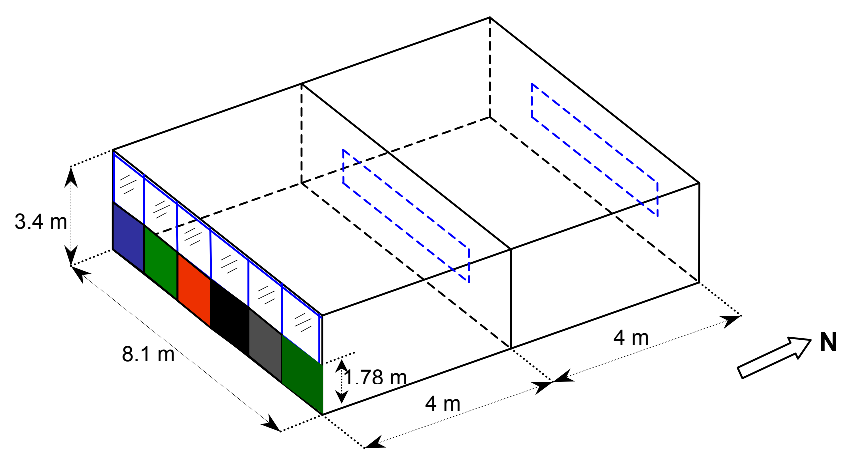


Figure 6-8 : Géométrie du volume étudié.

Les deux zones communiquent avec l'extérieur par deux façades, les autres parois étant considérées en contact avec des ambiances identiques (même température de l'air) à celle régnant dans la zone étudiée. Les ouvrants sont placés sur les deux façades et sur la paroi séparatrice. Ils ont une forme rectangulaire et sont centrés sur les parois les contenant. Le volume étudié se situe à un étage courant. Une structure légère est proposée en se basant sur la méthode de détermination de la classe d'inertie par « points d'inertie » de la réglementation RT 2000 [CSTB, 2000]. Le cumul des points d'inertie étant compris entre 7 et 8. Les caractéristiques thermiques des différentes parois sont [Tableau 6-4]:

[4] RAL : est une classification normalisée de couleurs.

	Matériau	Epaisseur [m]	Résistance thermique [$m^2.K.W^{-1}$]
Façades	Enduit (Extérieur)	0,01	0,0086
	Parpaings	0,20	0,23
	Isolant (laine de verre)	0,15	3,75
	Plâtre	0,01	0,025
Vitrage	Verre sodo-calcaire	0.008	0.008
	Lame d'air	0.015	0.6
	Verre sodo-calcaire	0.008	0.008
Planchers	Entrevous en bétons	0,20	0,17
Partitions	Plâtre	0,01	0,025
	Laine minérale	0,06	3,75
	Plâtre	0,01	0,025

Tableau 6-4 : Matériaux et résistance thermique du volume étudié.

Le coefficient de transmission thermique surfacique de la façade U est égal à 0,239 W/m^2.K avec une résistance superficielle globale Rsi +Rse égale à 0.17 m^2.K.W-1.

6.3.5 L'effet de masque

Dans le cas d'installations réelles, des ombres peuvent porter sur le capteur : ce sont les bâtiments voisins, les reliefs, la végétation, etc. Ces ombres ont un effet pénalisant sur la performance des modules solaires. Afin d'évaluer l'effet des masques sur le rendement du capteur intégré, notre choix s'est porté sur une configuration urbaine du type carré Haussmannien [Figure 6-9].

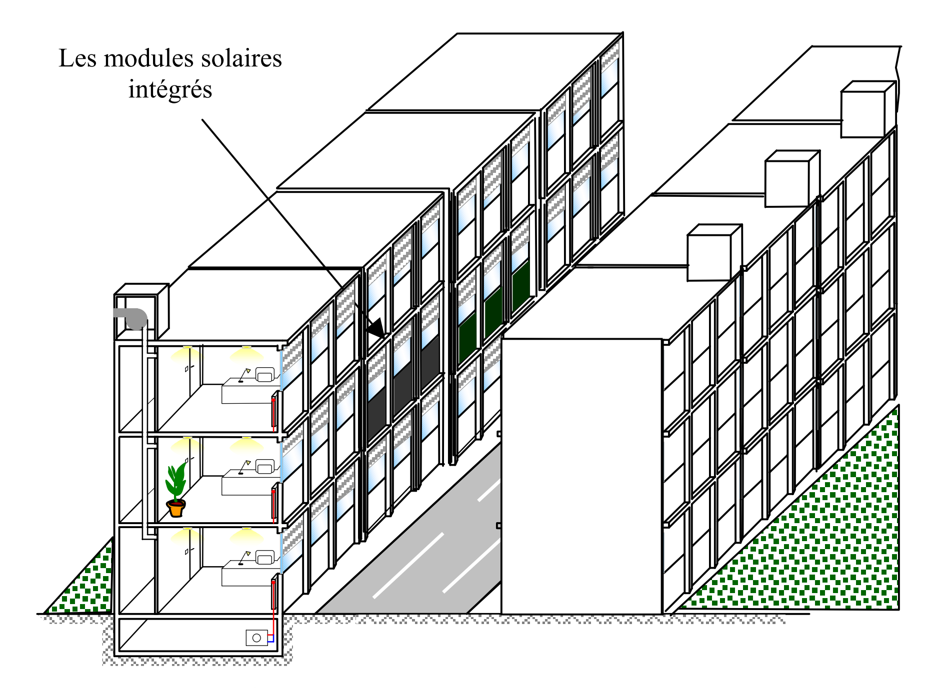


Figure 6-9 : Configuration urbaine Haussmannienne avec effet de masque sur les capteurs intégrés.

Les capteurs sont considérés comme intégrés au premier étage du bâtiment, pour des raisons de commodité dans les simulations (plancher adiabatique). Ils sont situés à une hauteur de 3,5m ; la hauteur d'un module y compris la partie vitrée ayant une hauteur de 3,5m. L'ensoleillement du capteur intégré dans la façade d'un bâtiment situé à Lyon pour cette configuration est illustré dans la figure suivante [Figure 6-10].

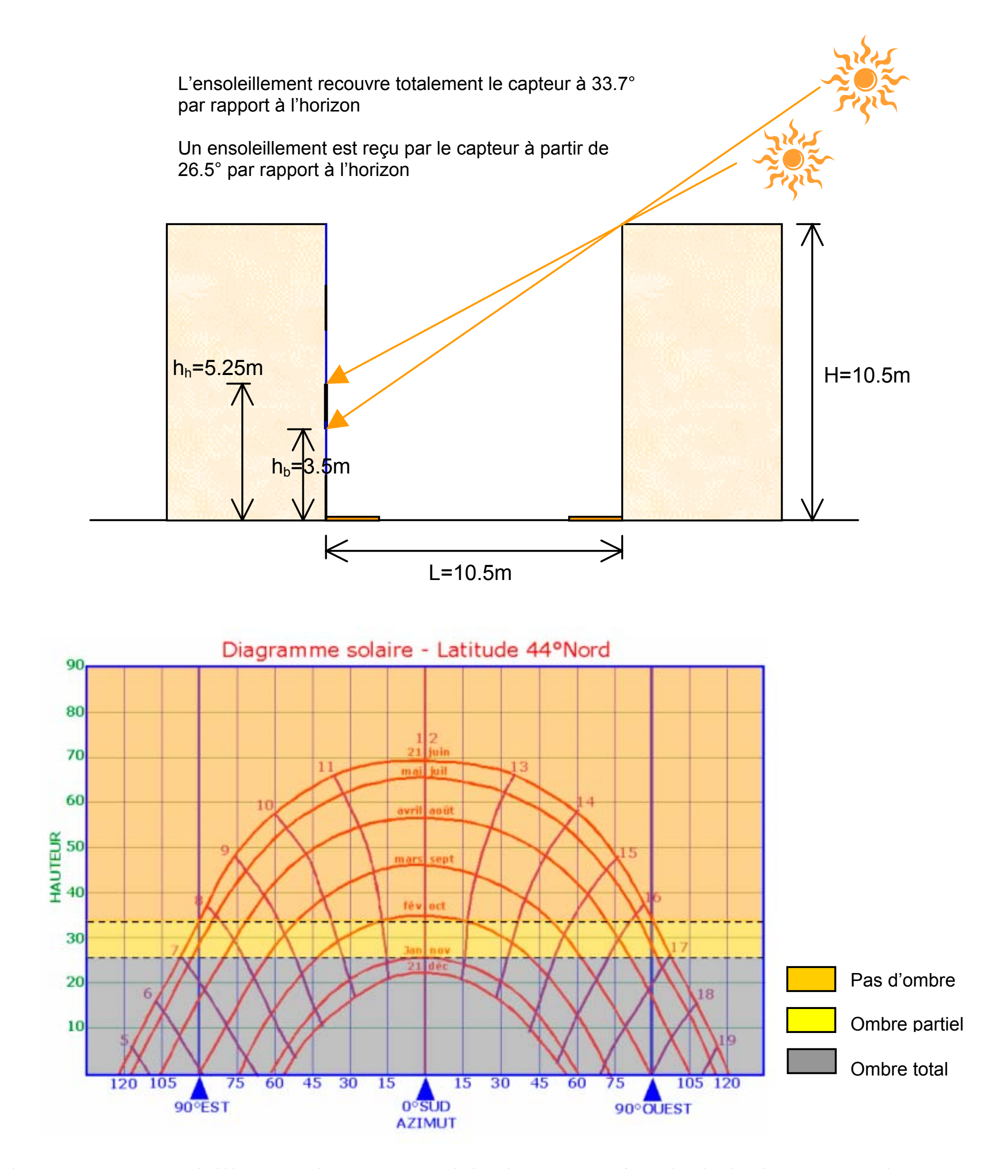


Figure 6-10 : Ensoleillement du capteur solaire intégré en façade du bâtiment (cas de Lyon).

6.4 Le modèle du bâtiment

Deux bâtiments sont modélisés, d'une part un bâtiment ayant une façade traditionnelle, d'autre part un bâtiment avec des capteurs intégrés dans la façade Sud. La modélisation est effectuée avec le logiciel TRNBuild. Elle a consisté d'abord à entrer dans le logiciel toutes les caractéristiques du bâtiment.

Pour effectuer cette opération, il est indispensable d'avoir connaissance de plans précis du bâtiment étudié, avec cotations et d'autres renseignements sur les matériaux employés. De plus, la présence d'occupants, d'activités et l'apport d'éléments externes doivent être parfaitement connus.

Il est important de rappeler que le logiciel TRNBUILD est consacré à la création d'un module particulier de TRNSYS : le module de Type 56. Celui-ci apparaît dans TRNSYS avec une série d'entrées, de paramètres de sorties comme n'importe quel autre module.

Les bâtiments se décomposant en deux volumes chacun, deux zones distinctes ont été générées pour chacun (avec et sans capteur en façade). À une zone correspond une page d'interface à compléter [Figure 6-11].

Chaque zone est délimitée par une série de murs eux-mêmes constitués de différentes couches de matériaux. La surface totale de la zone est requise ainsi que la chaleur spécifique moyenne de celle-ci afin de rendre compte de l'inertie thermique de la zone. L'existence ou non de fenêtre doit être précisée dans les caractéristiques du bâtiment. Des paramètres peuvent être ajoutés : ce sont la présence d'un système de chauffage, d'un système de refroidissement, d'apports thermiques, d'infiltrations d'air à température différente de l'ambiance ou encore de ventilation. Chaque paramètre a une valeur constante ou est fonction du temps ou encore d'une entrée dans le modèle de type 56. Ainsi, dans le cas du bâtiment avec capteur intégré, comme nous le verrons plus tard, l'apport thermique du capteur intégré est un aspect décisif dans le bilan énergétique du bâtiment.

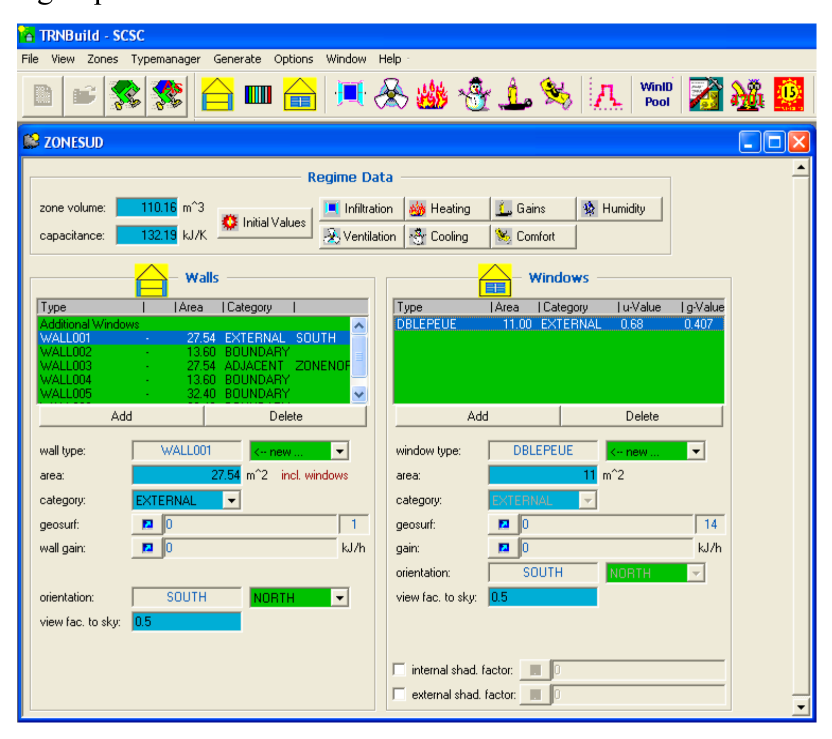


Figure 6-11 : Interface Windows des caractéristiques d'une zone dans TRNBuild.

Le pas de temps par défaut du type 56, et donc de TRNBuild, est l'heure. Cette valeur est due aux caractéristiques des algorithmes de calcul des transferts thermiques à travers les parois. En effet, la méthode mathématique de résolution est basée sur une série de calculs effectués à l'aide de la transformée en Z. Or, cette transformée est paramétrée sur un pas de temps horaire. Dans le cas général, il est difficile de changer ce paramètre sous peine de faire diverger le modèle et empêcher la création du module 56 [MUGNIER, 2002].

6.5 Le modèle du système solaire thermique

Le modèle du système solaire est construit dans le logiciel TRNSYS. La bibliothèque riche de TRNSYS possède la plupart des éléments qui nous sont nécessaires :

- un composant de lien avec MATLAB pour lire le code numérique des capteurs solaires plans intégrés développé ;
- un composant pour définir le profil d'utilisation ;
- un ballon de stockage ;
- des pompes, des tuyaux et des évacuations ;
- des contrôleurs.

Ces composants (Types) sont choisis et interconnectés en utilisant «l'Assembly Panel ». Ensuite pour chaque type nous définissons les paramètres et les entrées.

Les autres éléments nécessaires pour le modèle peuvent être fournis sous forme d'équations via le Type Equation, par exemple la quantité de consommation journalière d'eau chaude sanitaire.

6.5.1 Le capteur plan intégré

À partir des équations développées précédemment, un modèle numérique de capteur solaire intégré dans le bâtiment est rédigé sous le code MATLAB, en intégrant les fonctions qui servent à faire le lien avec TRNSYS (nombre de paramètres, pas de temps, …). La liaison entre MATLAB et TRNSYS se fait par le biais du TYPE 155 de la bibliothèque de TRNSYS.

Les entrées de notre modèle sont les suivantes :

- La température ambiante extérieure, la température à l'intérieur du bâtiment et la température du ciel ;
- La vitesse du vent ;
- La température du fluide à l'entrée du capteur ;
- Le débit du fluide à l'entrée du capteur.

Les paramètres sont les suivants :

- Les dimensions et le nombre de capteurs ;
- Les caractéristiques du fluide caloporteur ;
- Les caractéristiques thermiques et les dimensions des matériaux utilisés (isolants, absorbeur en cuivre).

Les sorties sont :

- La quantité d'énergie utile produite par le système ;
- La température moyenne de l'absorbeur ;
- La température du fluide à la sortie du capteur ;
- Le débit du fluide à la sortie du capteur.

6.5.2 Le stockage

Le modèle de ballon utilisé est le type 4 de la bibliothèque TRNSYS. Il s'agit du modèle de ballon de stockage avec stratification. Pour un stockage stratifié, Beckmann et Duffie [DUFFIE, 1980] ont donné l'expression du bilan thermique au nœud i :

$$m_j \frac{dT_{s,j}}{d\tau} = \left(\frac{UA}{Cp}\right)_j \left(T_a' - T_{s,j}\right) + F_j^c \dot{m}_c \left(T_{si} - T_{s,j}\right) + F_j^L \dot{m}_L \left(T_L - T_{s,j}\right) + \begin{cases} \dot{m}_{m,j}\left(T_{s,j-1} - T_{s,j}\right) & si\ \dot{m}_{m,j} > 0 \\ \dot{m}_{m,j+1}\left(T_{s,j} - T_{s,j+1}\right) & si\ \dot{m}_{m,j} > 0 \end{cases}$$

Équation 6-36

où Tsi la température du fluide à l'entrée du stockage en provenance du capteur ;
TL la température du fluide à l'entrée du stockage en provenance du réseau urbain ;
m_j la masse de la tranche j ;
$\dot{m}_c$ le débit massique dans le circuit du capteur ;
$\dot{m}_L$ le débit massique dans le circuit du puisage d'eau chaude ;
F_j^c et F_j^L sont des fonctions de contrôle de fonctionnement des pompes.

6.5.3 La régulation

Le régulateur qui contrôle la pompe de circulation compare la différence de température $\Delta T = T_{cap} - T_{bal}$ (T_{cap} étant la température du fluide arrivant dans le ballon et provenant du capteur, et T_{bal} étant a température du fluide sortant du ballon et retournant au capteur) à deux valeurs différentes pour éviter les fluctuations. La valeur limite haute ΔT_1 utilisée est prise égale à 8°C et la valeur basse ΔT_2 à 2°C : la pompe se met en marche si $\Delta T > \Delta T_1$ et s'arrête si $\Delta T < \Delta T_2$.

6.6 Le système global

En reprenant toutes les caractéristiques techniques du système solaire et du bâtiment, décrites dans le protocole de simulation, une modélisation de l'intégralité du système a été réalisée. Le modèle global de chauffe eau solaire avec des capteurs intégrés dans la façade est représenté dans TRNSYS par les composants incluant à la fois le bâtiment, le champ de capteurs solaires, le ballon de stockage, la pompe de circulation, le circuit hydraulique, les vases d'expansion, le régulateur et tous les autres modules nécessaires soit à calculer les sollicitations à partir des données météorologiques, soit à stocker et analyser les résultats.
Av vu de la figure représentant le modèle global, nous pouvons remarquer la complexité dans la constitution et l'agencement de tous les modules sur l'interface graphique [Figure 6-12]. Seuls des utilisateurs TRNSYS avertis sauront se retrouver sans difficulté.

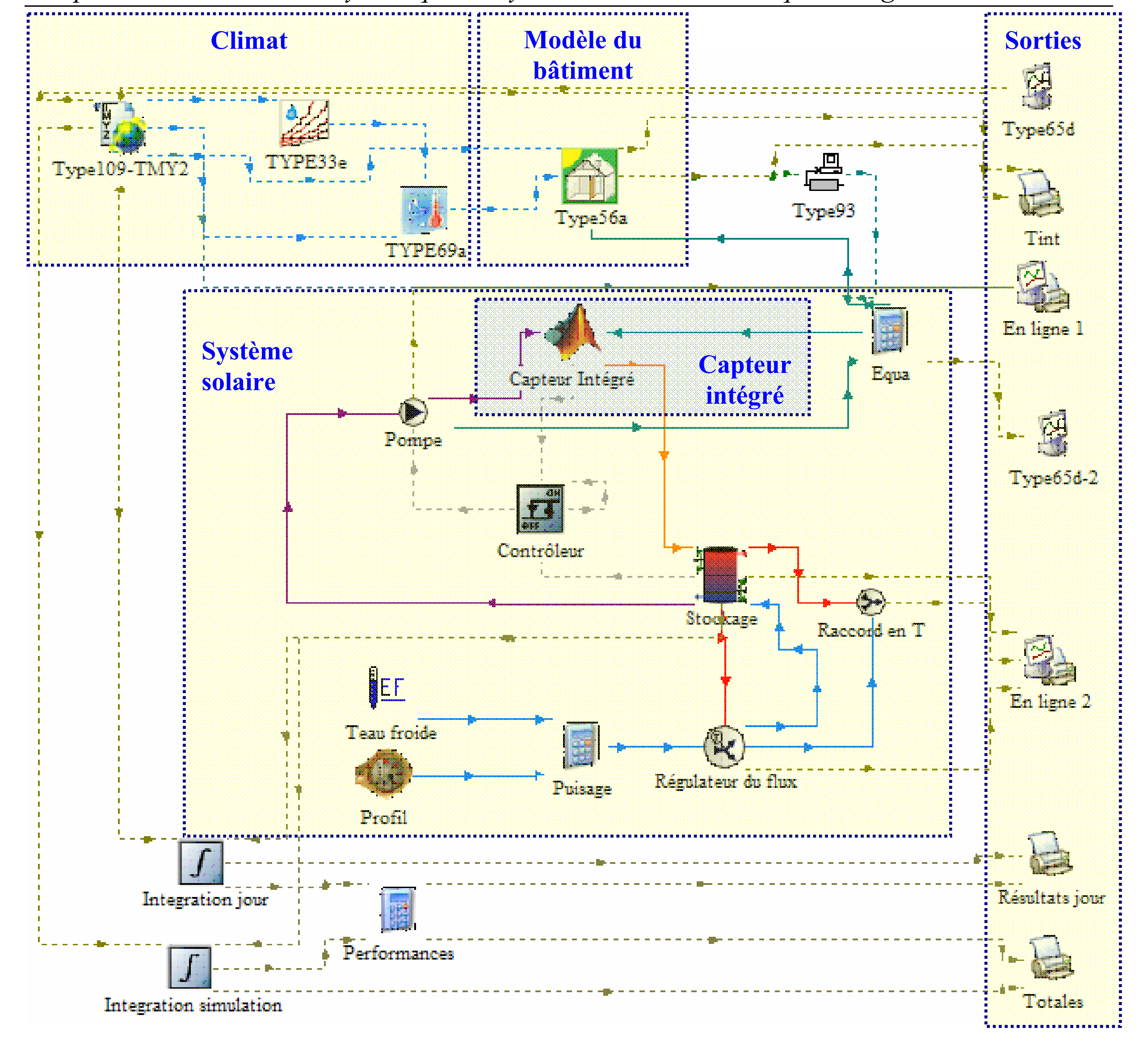


Figure 6-12 : Le modèle graphique du modèle de système solaire intégré en façade du bâtiment.

6.7 Étude paramétrique

L'une des principales caractéristiques des éléments solaires intégrés est de répondre à la contrainte de couleur d'absorbeur liée aux exigences de l'architecte et du maître d'ouvrage. Nous devons nous résoudre à étudier l'influence des paramètres de l'émissivité et de l'absorptivité sur les performances énergétiques de ces éléments.

6.7.1 Influence du coefficient d'absorption de l'absorbeur

L'étude de l'influence du coefficient d'absorption dépend de l'élément solaire simulé et des conditions météorologiques. Nous avons effectué cette étude en réalisant une série de simulations d'un système solaire ayant 2 m² de surface de captage et 150 l de volume de stockage, avec le fichier météorologique enregistré sur la journée du 13 juillet 2005 sur l'Isle d'Abeau. Cette journée est bien ensoleillée. En effet, l'irradiation solaire horizontale atteint 900 W/m² [Figure 6-13].

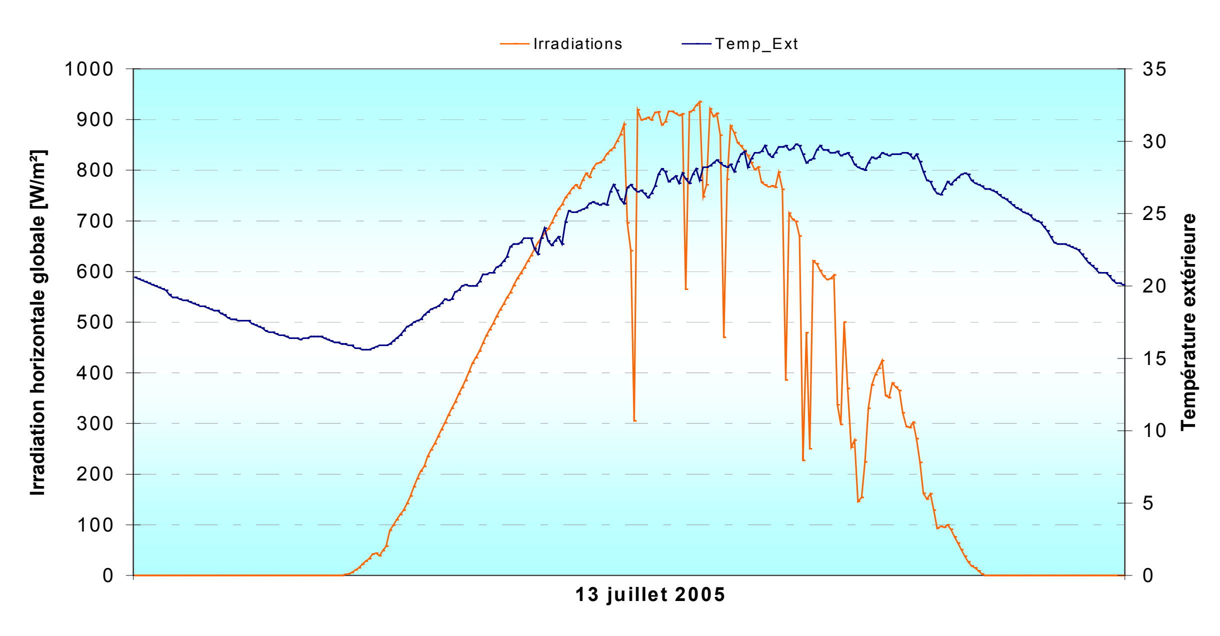


Figure 6-13 : Eclairement énergétique et température extérieure à l'Isle d'Abeau le 13 juillet 2005.

Le graphique suivant montre que la température moyenne (sur une journée) de l'eau dans le ballon augmente très fortement avec le coefficient d'absorption. Augmenter l'absorptivité de 0,1 permet en moyenne d'augmenter la température du ballon de 0,92°C. Pour avoir une température journalière moyenne supérieure à 30°C il faut ainsi que l'absorptivité soit supérieure ou égale à 0,87 (quand l'émissivité est de 0,5) [Figure 6-14]. Ce paramètre est donc très important à prendre en compte lors du choix de la couleur du capteur.

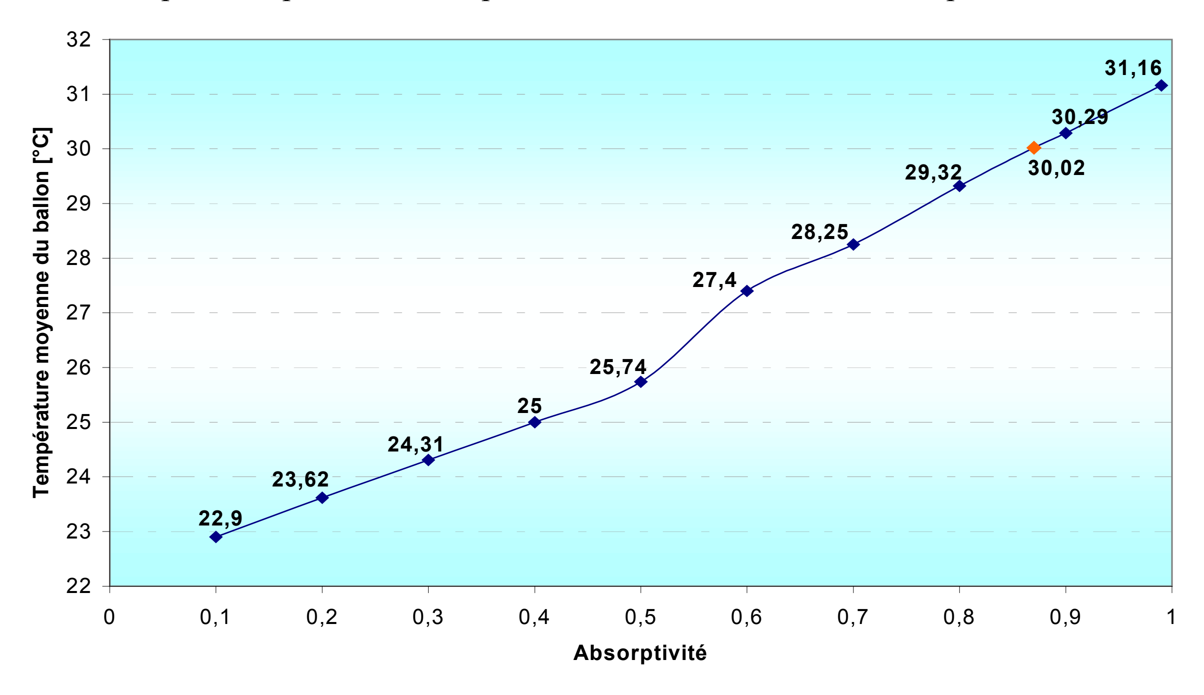


Figure 6-14 : Influence du coefficient d'absorption sur la température moyenne de l'eau dans le ballon.

6.7.2 Influence du coefficient d'émission de l'absorbeur

L'étude de l'influence du coefficient d'absorption dépend elle aussi de l'élément solaire simulé et des conditions météorologiques. La seconde série de simulations, menée aussi sur la

période du 13 juillet 2005 du fichier météorologique enregistré sur l'Isle d'Abeau, a permis de comprendre l'influence de l'émissivité sur les performances des capteurs. Le paramétrage du composant était le suivant :

- Coefficient d'absorption = 0,7 ;
- Facteur du rendement de l'ailette de l'absorbeur = 0,8.

Les résultats des simulations, présentés dans le graphique suivant, montrent que l'augmentation de l'émissivité entraîne, comme il l'a été écrit précédemment, une diminution des performances des capteurs. Toutefois cette diminution est très faible : en effet passer d'un coefficient d'émission de 0,1 à 0,9 implique une diminution de la température moyenne de ballon de seulement 0,4°C [Figure 6-15].

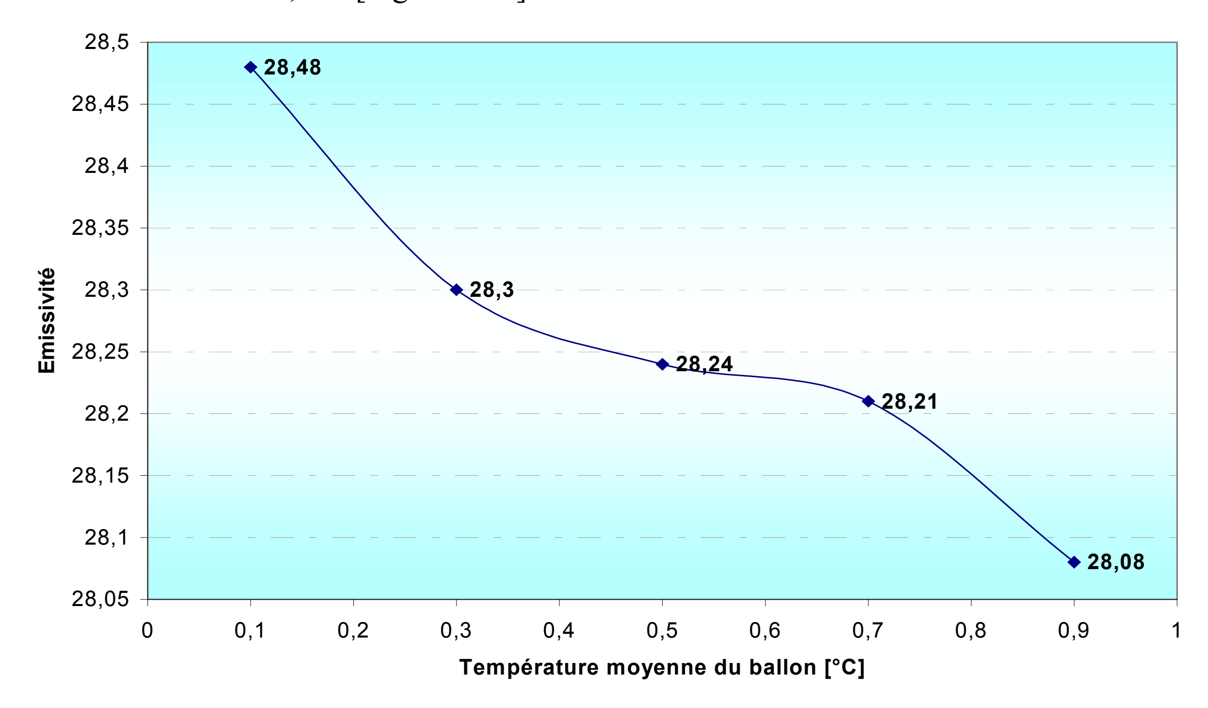


Figure 6-15 : Influence du coefficient d'émission sur la température de l'eau dans le ballon.

Ces résultats montrent que l'absorptivité est un paramètre beaucoup plus influent que l'émissivité sur la performance énergétique du capteur intégré. L'absorptivité est ainsi un facteur déterminant dans le choix de la couleur du capteur solaire.

6.8 Simulations numériques

6.8.1 Comparaison entre les couleurs d'absorbeurs

Nous avons simulé la palette des douze couleurs présentées dans le paragraphe « Couleurs de l'absorbeur » du protocole de simulations. Notre objectif était de classer les couleurs des absorbeurs en distinguant celles qui peuvent avoir des performances satisfaisantes et celles qui devront être déclinées. Pour un système solaire ayant un module de captage solaire de 2,1m² et un ballon de stockage de 100 l, les simulations sont effectuées sur la période bien

ensoleillée allant du 13 au 18 juillet 2005 du fichier climatique enregistré sur le site de l'Isle d'Abeau [Figure 6-16].

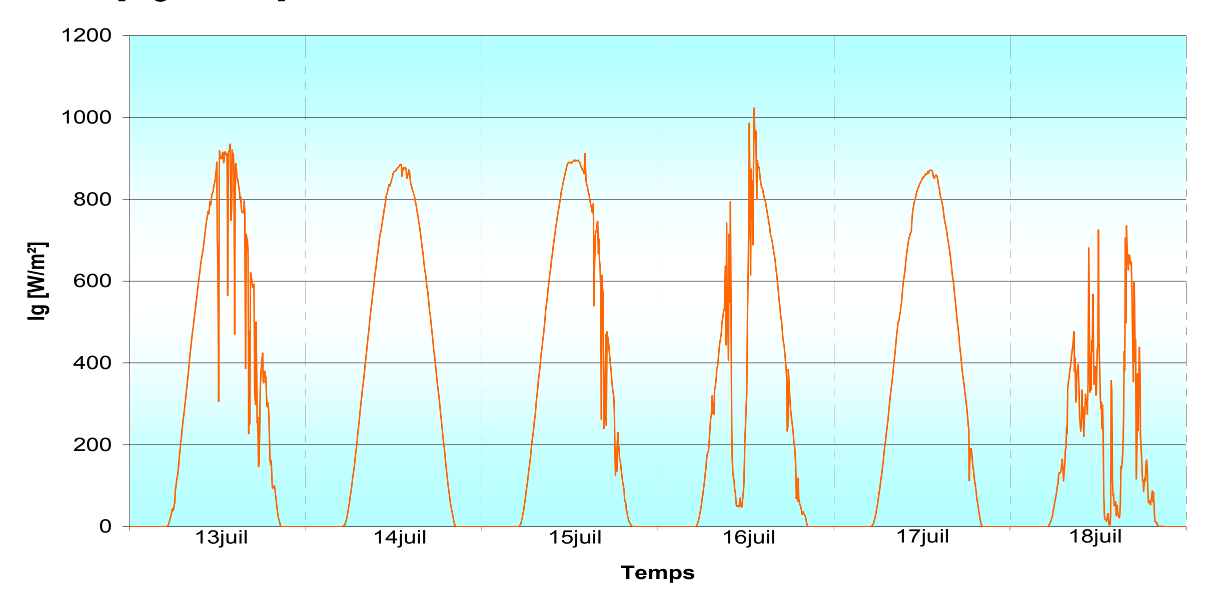


Figure 6-16 : Rayonnement horizontal global du 13 au 18 juillet 2005 à l'Isle d'Abeau.

Les maxima atteints par les différents capteurs selon la couleur de leur absorbeur ont des valeurs très hétérogènes. Les écarts de températures les plus élevés sont entre la couleur C1 (Noir chrome) et la couleur C7 (RAL 4007) où la différence entre les deux maxima est de plus de 15°C. Quatre couleurs seulement permettent d'atteindre un maximum supérieur à 40°C : C1, C2, C3 et C5. Les deux couleurs d'absorbeur C4 (RAL 3000) et C7 ([RAL 4007) ne permettent même pas d'atteindre un maximum supérieur à 35°C [Figure 6-17].

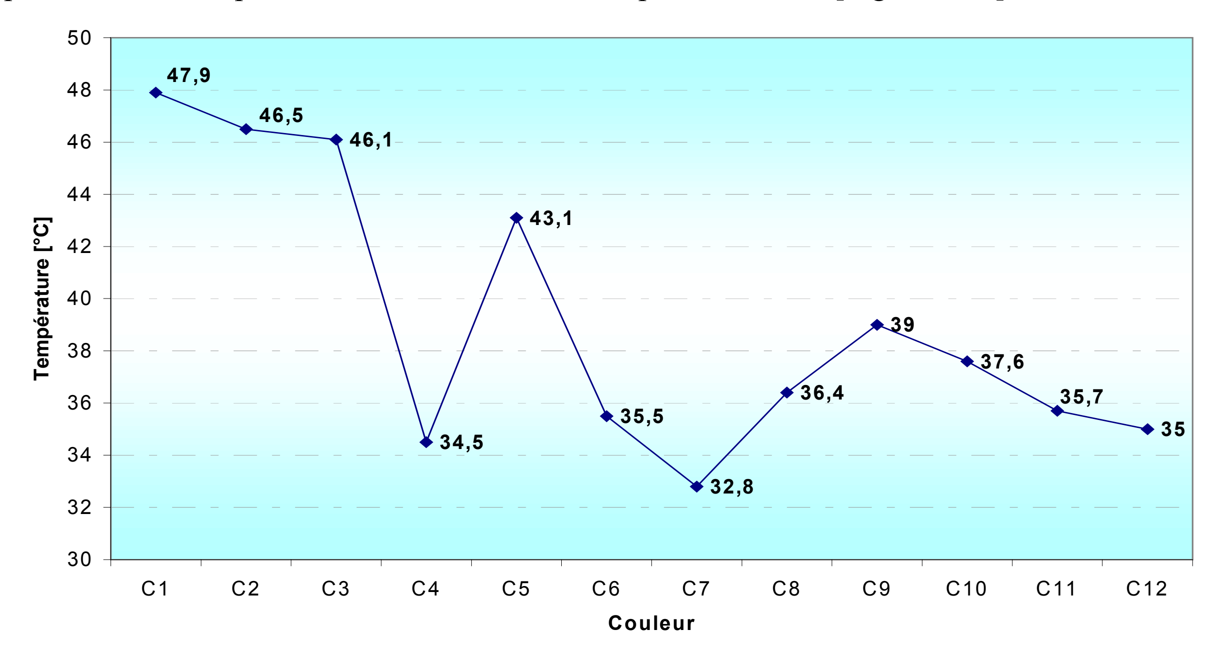


Figure 6-17 : Maximum atteint par la température de ballon (sur la période du 13 au 18 juillet).

L'analyse de la moyenne de la température de ballon sur la durée de simulation confirme les résultats précédents. Seules 4 couleurs de capteur permettent d'obtenir des températures

moyennes supérieures à 30°C [Figure 6-18]. Les autres couleurs ne permettraient ainsi pas de fournir de l'eau chaude sanitaire sans appoint dans notre zone géographique, même en été, avec de bonnes conditions climatiques.

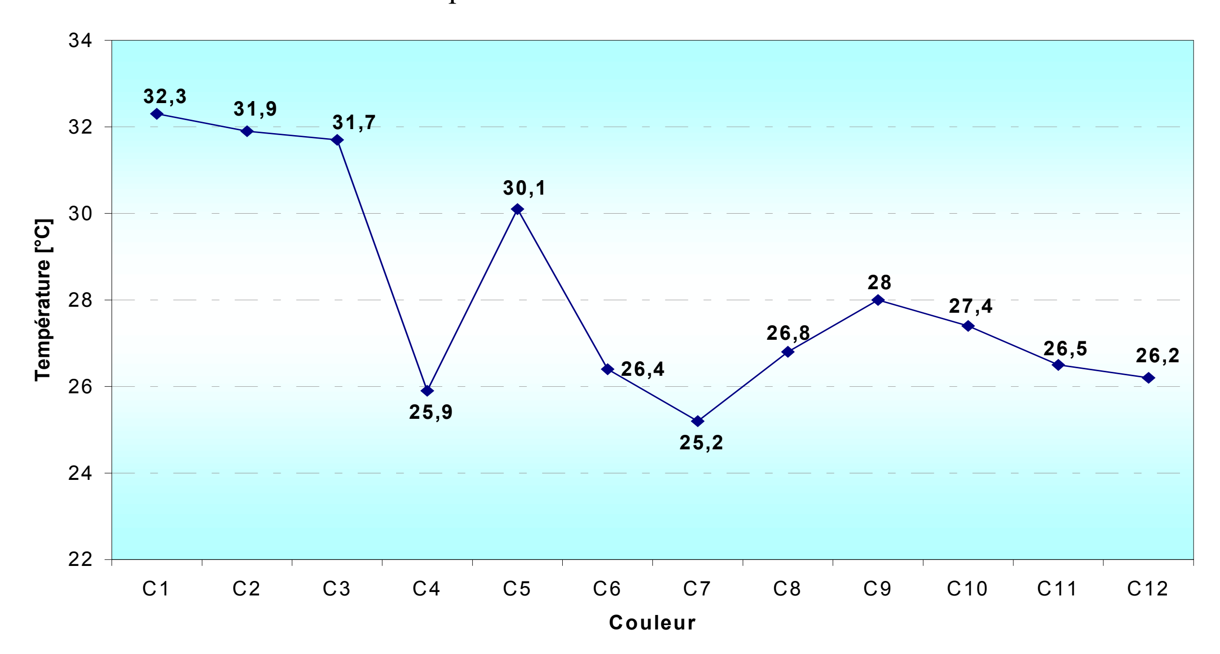


Figure 6-18 : Moyenne d la température de ballon selon la couleur (sur la période du 13 au 18 juillet).

L'analyse des deux graphiques précédents permet par ailleurs d'établir un classement des couleurs des absorbeurs selon les performances énergétiques obtenues. Naturellement, plus la température moyenne atteinte par l'eau du ballon est élevée, meilleures sont les performances du capteur solaire. Il est à noter que les deux graphiques permettent d'obtenir le même classement [Figure 6-19].

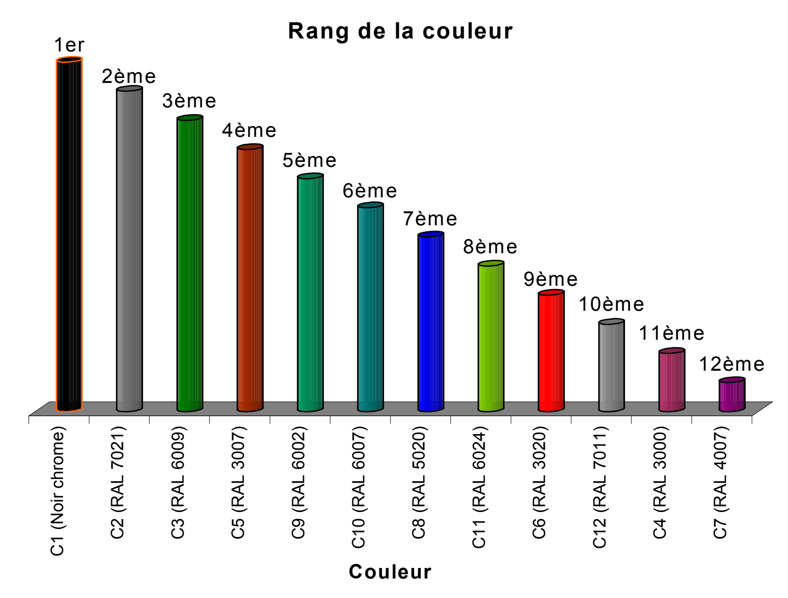


Figure 6-19 : Classement des couleurs d'absorbeurs du plus performant (1er) au moins performant (12ème).

Pour vérifier si les conclusions tirées précédemment sur l'importance des coefficients d'absorption et d'émission étaient cohérentes, nous avons tracé sur un graphique la valeur de

ces coefficients en fonction du classement par rapport à la performance énergétique [Figure 6-20]. Ce graphique confirme bien le fait que les performances dépendent en grande partie de la valeur du coefficient d'absorption.

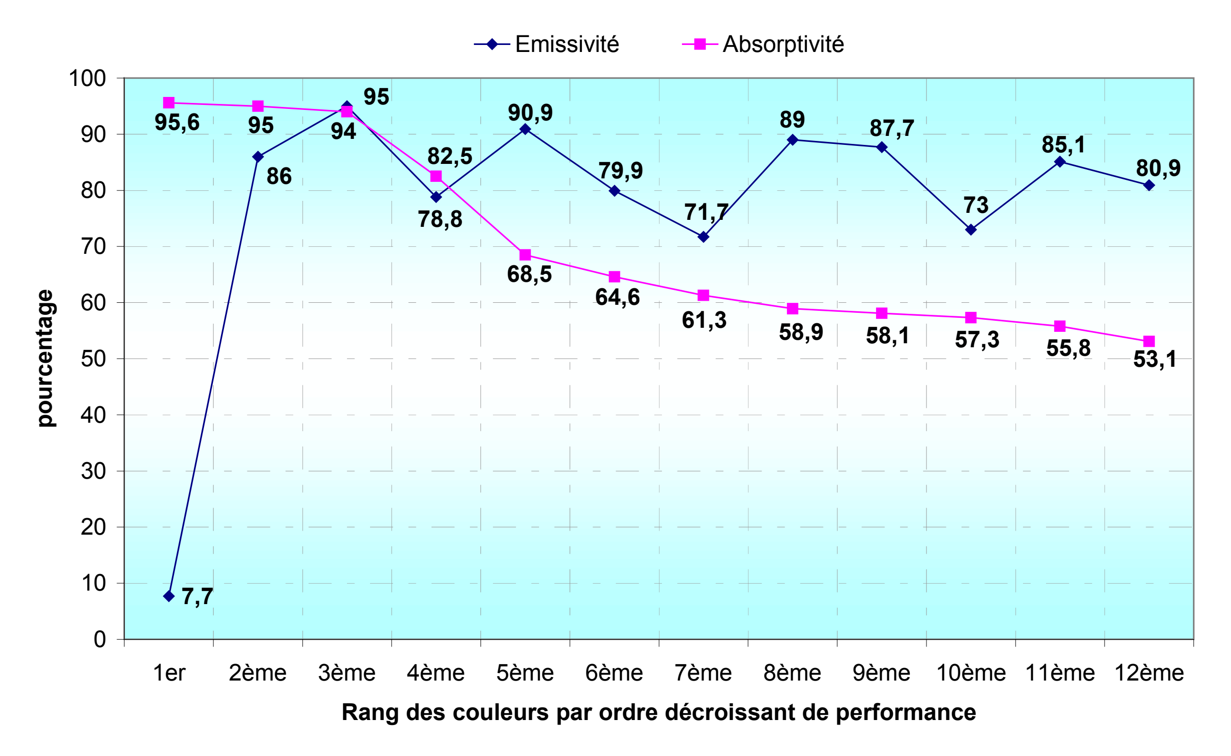


Figure 6-20 : Absorptivité et émissivité des capteurs classés selon leur couleur.

La couleur permettant au capteur d'obtenir les meilleures performances est celle dont l'absorptivité est la plus élevée. Nous remarquons aussi que plus cette dernière diminue et moins les performances du capteur sont élevées et ce indépendamment des valeurs de l'émissivité. Même lorsque cette dernière diminue de manière non négligeable, comme par exemple en perdant 14 points entre les capteurs classés 9ème et 10ème (ce qui devrait améliorer ces performances), cela ne permet pas de contrecarrer le fait que l'absorptivité ait baissé dans le même temps de seulement 0,8 point.

Ces résultats confirment que le choix d'une couleur d'absorbeur devra principalement tenir compte de son coefficient d'absorption afin d'avoir de bonnes performances énergétiques.

6.8.2 Comparaison avec un système solaire de référence

Après avoir fait une étude paramétrique du modèle global, et après avoir étudié les performances des capteurs selon la couleur de l'absorbeur, des simulations sont menées pour les sept villes choisies et pour trois orientations : Sud (azimut = 0°), Ouest (azimut = 90°) et Est (azimut = 270°). Parmi les couleurs les mieux classées, nous choisissons de mener deux séries de simulations.

La première série correspond à considérer trois couleurs d'absorbeur : RAL 3007, RAL 6007 et RAL 5020, qui sont des couleurs moyennement classées. Elles sont simulées dans le but d'étudier la faisabilité d'un tel produit. En effet si la couleur choisie n'est pas trop pénalisante

pour la performance énergétique, tout en gagnant en intégration, nous retrouvons l'un de nos objectifs cités dans la partie « Problématique liée à l'intégration technico-architecturale », où l'on recherche un bon compromis entre l'installation technique des systèmes solaires thermiques actifs, en termes notamment de faisabilité et de productivité, et leur intégration architecturale.

Ensuite, les trois couleurs les mieux placées sont simulées. Les couleurs des absorbeurs correspondants sont le chrome noir, le RAL 7021 et le RAL 6009. Ces mêmes couleurs seront utilisées dans la fabrication de trois prototypes qui seront installés dans la suite sur un bâtiment expérimental sur l'Isle d'Abeau. Ceci nous permettra de confronter les résultats du modèle numérique aux résultats du modèle expérimental. Une prise en compte de l'effet de masque sur la performance énergétique du composant solaire est faite dans ce cas.

Dans toutes les simulations, les résultats obtenus sont comparés aux résultats des simulations des systèmes solaires de référence, avec des capteurs inclinés de 45° et orientés plein Sud.

6.8.2.1 Première série de simulations

Nous avons choisi de mener des simulations d'un système solaire ayant 8 m² de surface de captage et 300 l de volume stockage, sur un an et sur trois mois dans 3 saisons différentes : février, mai et août. Ces trois mois ont une différence significative en termes d'énergie incidente, surtout pour le cas des capteurs verticaux. Il est intéressant d'étudier le comportement des capteurs intégrés dans différentes saisons. La figure suivante présente le profil annuel des éclairements énergétiques journaliers moyens à Lyon sur une surface horizontale, une surface inclinée de 45°, et une surface verticale [Figure 6-21].

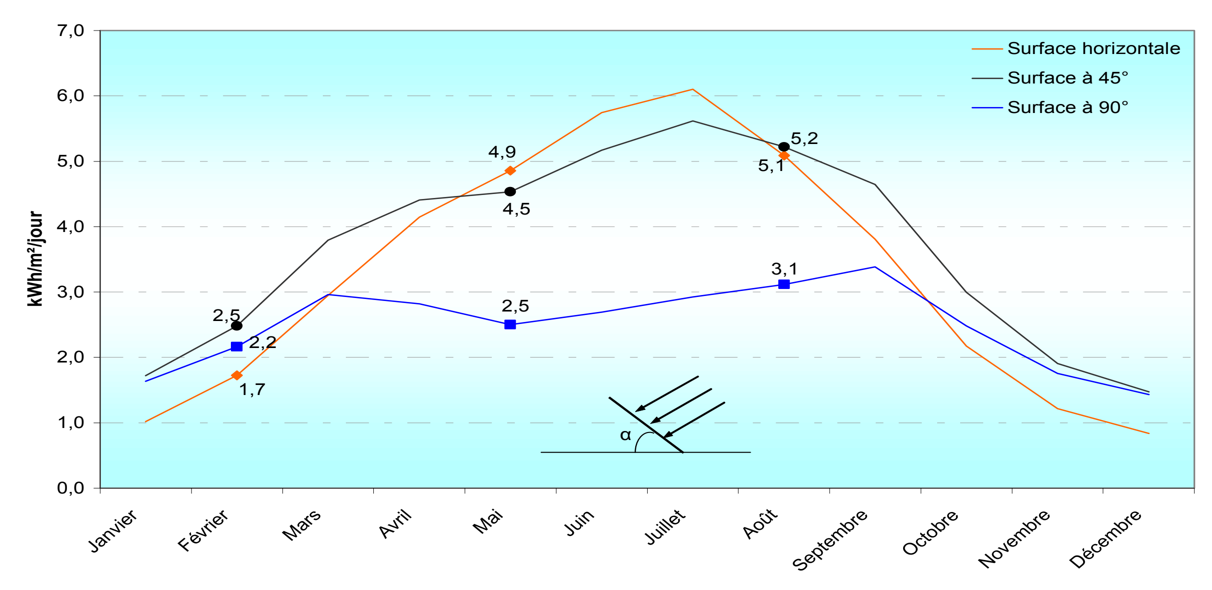


Figure 6-21 : Rayonnement effectif sur une surface (moyenne en Lyon).

Le but de cette première série de simulations est d'étudier d'une façon préliminaire l'intérêt et la faisabilité de notre proposition d'intégration considérée (l'intégration dans la façade à vitrage parclosé). Pour cela nous calculons la quantité d'énergie utile produite et le

pourcentage de la perte en performance énergétique par rapport à un système solaire traditionnel avec des capteurs solaires C8S non intégrés dans le bâtiment.

Pour des capteurs orientés vers le Sud, des simulations menées sur la période d'une année montrent que la quantité d'énergie utile produite par le système solaire subit une perte de presque la moitié pour les capteurs noir intégré et rouge intégré, et ceci pour les trois villes considérées [Figure 6-22]. En effet, pour Lyon, la quantité d'énergie utile produite avec les capteurs de référence (Qu = 3201 kWh) devient deux fois moins importante lorsqu'il s'agit de capteurs noirs intégrés dans la façade parclosé (Qu = 1663 kWh), ou lorsqu'on remplace ces capteurs par des capteurs rouges (RAL 3007) intégrés (Qu = 1424 kWh). Cette perte devient plus importante (de l'ordre de 3) lorsqu'on utilise des absorbeurs verts (RAL 6007) (Qu = 1140kWh) ou des absorbeurs bleus (RAL 5020) (Qu = 1089 kWh). Ces chutes en performance sont essentiellement dues aux caractéristiques des absorbeurs et à l'angle d'inclinaison des capteurs intégrés.

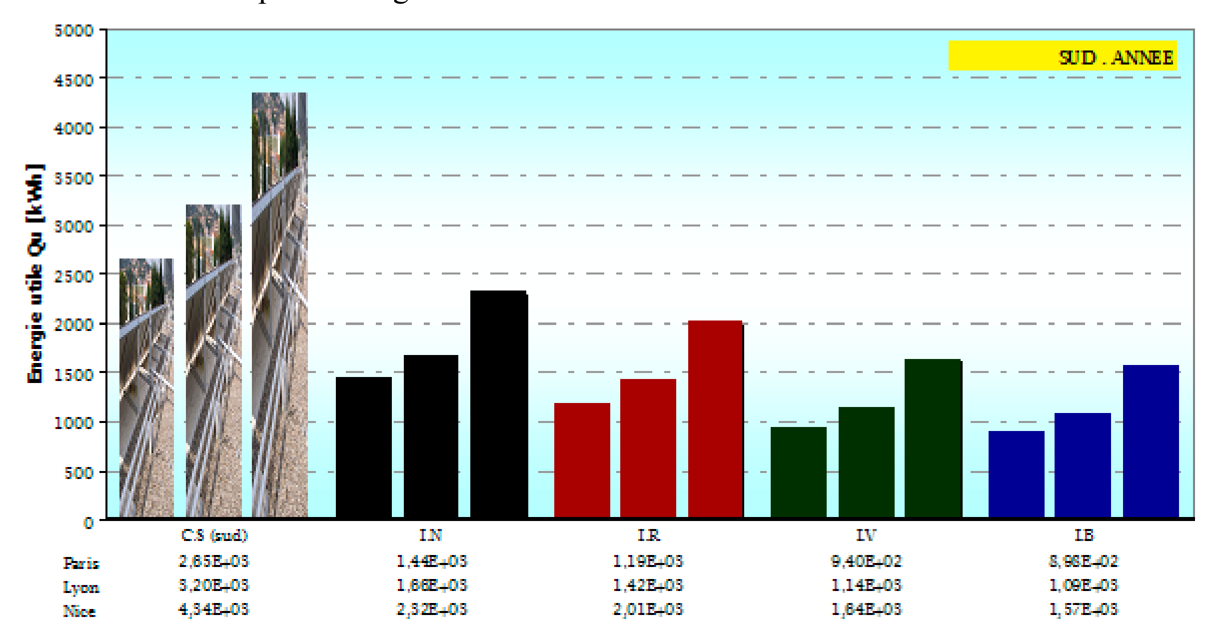


Figure 6-22 : Quantité d'énergie utile en un an pour des capteurs orientés Sud (az=0°).

Afin de pouvoir comparer le taux de perte de performance en fonction de chaque ville, nous avons tracé l'évolution de la quantité d'énergie utile pour les trois villes et les quatre couleurs simulées, en considérant que les quantités d'énergie produite dans les trois villes par des systèmes ayant des capteurs non intégrés dans le bâtiment sont des valeurs référence (100%), le but étant de calculer en pourcentage la quantité d'énergie produite par des capteurs intégrés par rapport à cette valeur référence [Figure 6-23]. Le graphique montre que le taux de perte correspondant à chaque couleur d'absorbeur est du même ordre pour les trois villes, donc pour trois climats différents en France. En effet, pour un capteur intégré ayant un absorbeur de couleur verte (RAL 6007), les taux de production d'énergie utile représentent 35,5% de la quantité d'énergie utile produite par un système traditionnel à Paris, 35.6% à Lyon et 37,7% à Nice.

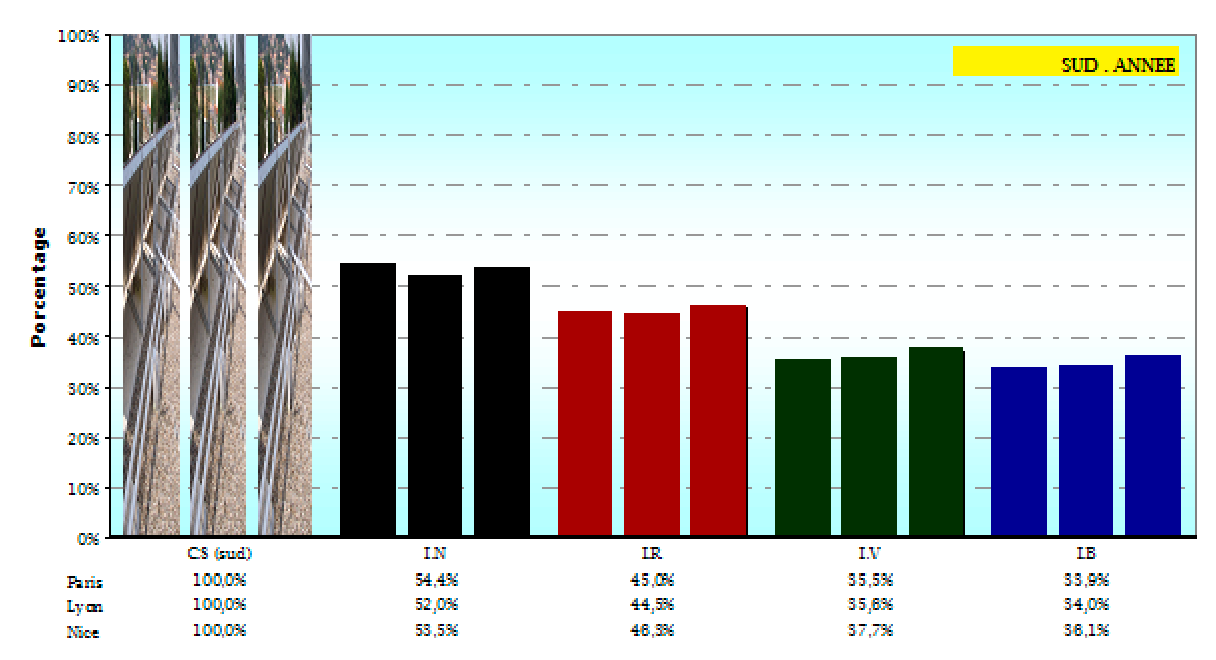


Figure 6-23 : Pourcentage d'énergie utile en un an pour une orientation Sud (az=0°).

Ce graphique confirme aussi le taux de perte des capteurs avec des absorbeurs bleus (RAL 5020) et verts (RAL 6007) qui subissent des pertes dans un rapport de 1 à 3 par rapport aux capteurs de référence. Afin de voir l'impact de cette perte sur la surface de captage et le nombre de modules solaires, nous calculons la superficie nécessaire au capteur le moins performant (RAL 5020) pour reproduire la même quantité d'énergie utile que nous pouvons obtenir lorsque nous installons des capteurs traditionnels dans une position optimale [Figure 6-24].

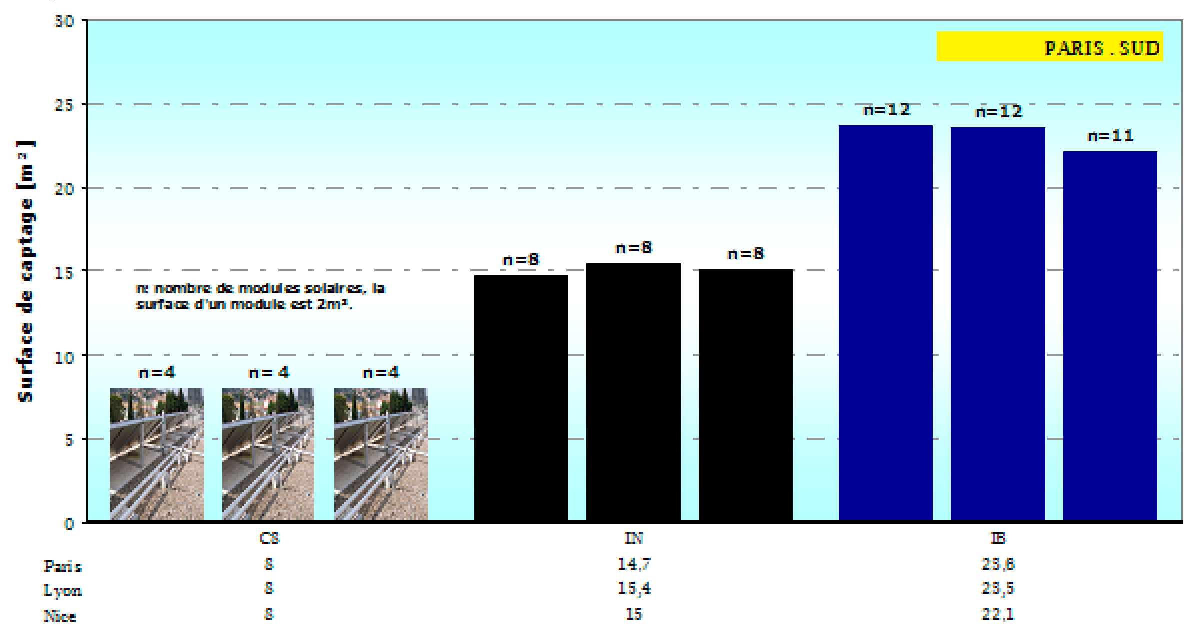


Figure 6-24 : Superficie de captage nécessaire aux capteurs intégrés pour égaler les capteurs référence (az=0°).

Les résultats montrent qu'une surface de captage de 23m² avec des absorbeurs bleus (RAL 5020) pourra produire la même quantité d'énergie que le système de référence ayant 8 m² de capteurs. Et si nous considérons que le produit intégré est modulaire et qu'il a une surface de

2 m², équivalente à la surface d'un capteur C8 utilisé dans le système de référence, nous trouvons que nous avons besoin d'installé 12 modules intégrés pour avoir la même performance de 4 capteurs C8 installés sur le toit d'un bâtiment. Ces résultats montrent que, pour la couleur la moins performante, le surplus dans la surface de captage n'est pas considérable. En effet, l'augmentation de surface de captage est contrebalancée par le faible surcoût du module intégré.

Pour les orientations Est et Ouest, les pertes sont plus grandes et la proposition d'intégration dépendra plus de la surface disponible (problème souvent minime dans le cas des façades) et du surcoût correspondant. Pour une orientation Est, les résultats des simulations sur une période d'un an montrent que le capteur bleu (RAL 5020) ne produit plus que 20% de la quantité d'énergie utile qui pourrait être produite par le système référence [Figure 6-25].

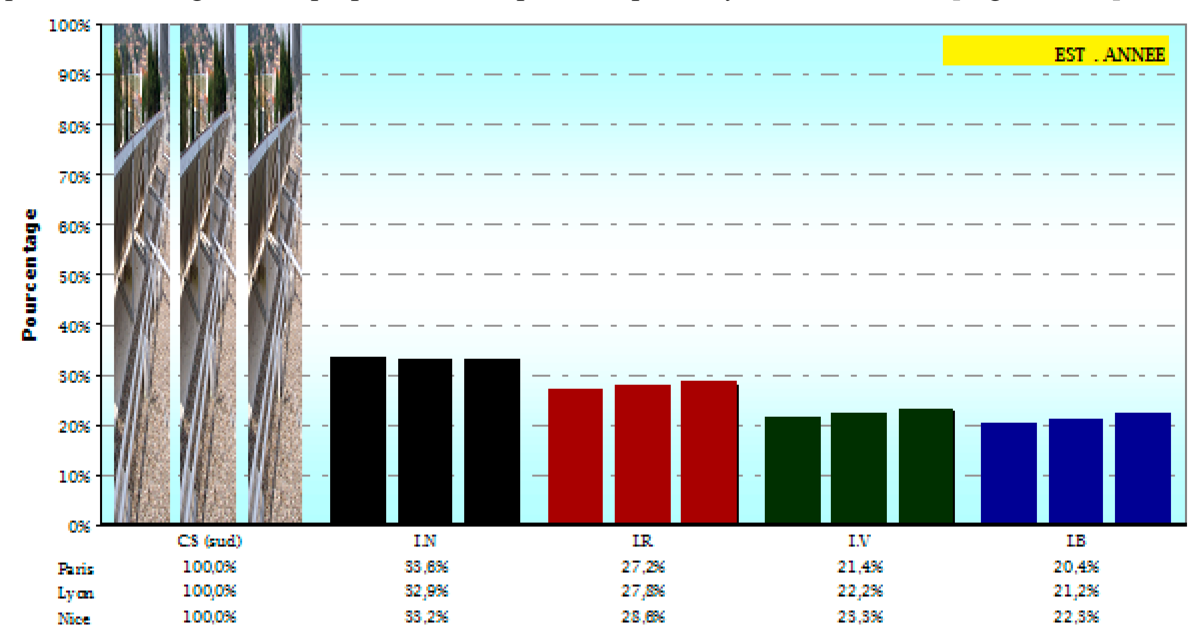


Figure 6-25 : Pourcentage d'énergie utile en un an pour une orientation Est (az=270°).

Regardons maintenant les résultats des simulations effectuées sur une période d'un mois pour trois saisons différentes. Considérons le cas de capteurs installés dans un bâtiment à Paris, orientés vers le Sud. Les résultats de février nous révèlent une chute de 54,5% du rendement du système solaire ayant des capteurs noirs intégrés en façade à vitrage parclosé par rapport à un système traditionnel [Figure 6-26]. En effet, si l'on considère à 100% l'énergie fournie par le système de référence, le système intégré peut produire 45,5% de la quantité d'énergie utile produite avec des capteurs C8S.

Ce même graphique nous permet de distinguer l'effet pénalisant de l'utilisation des couleurs sur la performance, indépendamment de l'impact de l'inclinaison des capteurs intégrés, en comparant les pertes en performance des capteurs avec absorbeurs de couleurs RAL 3007 (rouge), RAL 6007 (vert) et RAL 5020 (bleu), au capteur avec un absorbeur noir intégré en façade. Ainsi, nous observons une chute de rendement de 29,8% du système avec un absorbeur RAL 3007 (rouge), 51,5% avec un absorbeur RAL 6007 (vert), et 53,4% du

système avec un absorbeur RAL 5020 (bleu), tous par rapport au système avec un absorbeur noir intégré en façade.

Ainsi la performance du capteur avec un absorbeur de couleur RAL 3007 (rouge) est la plus proche de celle du capteur avec un absorbeur noir classique. Les couleurs RAL 6007 (vert) et RAL 5020 (bleu) suivent de loin sur le plan de performance.

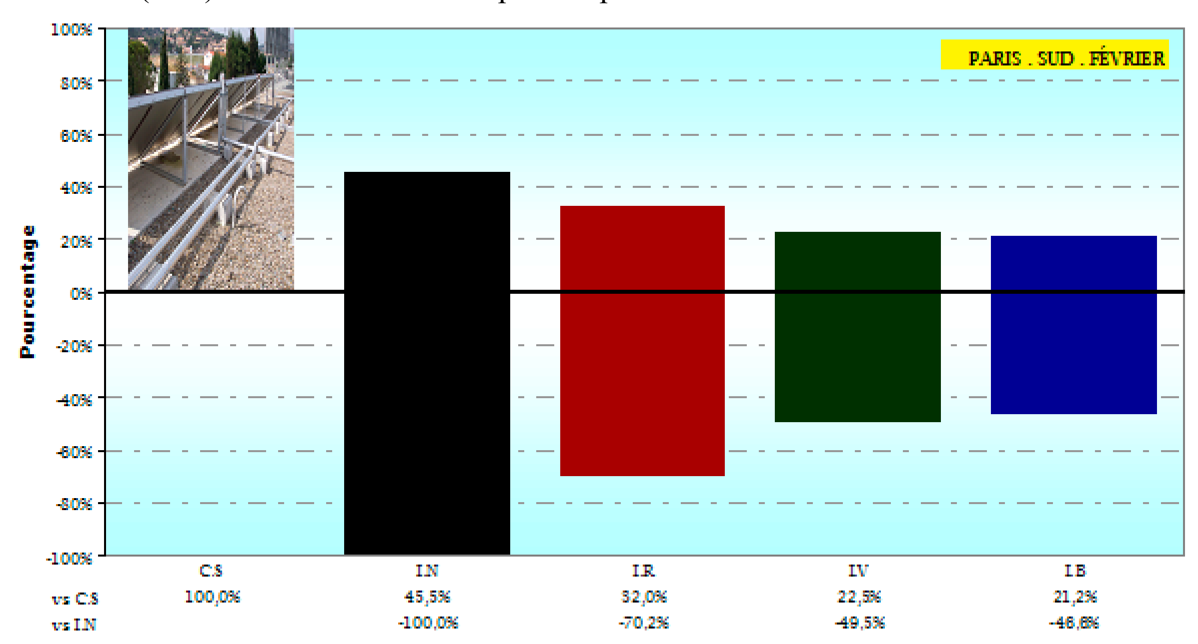


Figure 6-26 : Rendements en pourcentage des capteurs solaires orientés Sud à Paris en février.

Regardons maintenant les résultats des simulations sur l'échelle des trois mois choisis, afin d'observer le comportement du produit dans trois saisons différentes [Figure 6-27].

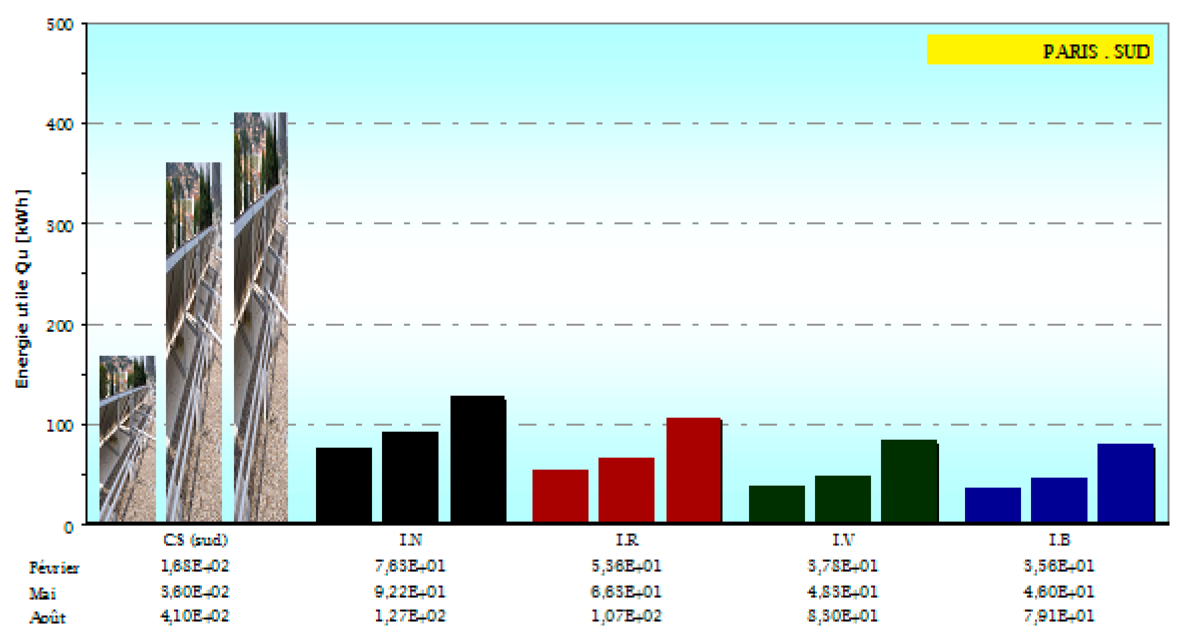


Figure 6-27 : Quantité d'énergie utile sur les trois mois considérés pour des capteurs orientés Sud (az=0°).

Les résultats montrent que la production énergétique pour les capteurs verticaux est plus régulière sur les trois saisons, ceci revient au fait que les irradiations sur des surfaces verticales sont plus homogènes comme l'a montré le profil présenté dans la Figure 6-21. Donc

pour une demande énergétique constante pendant l'année, les capteurs intégrés dans la façade peuvent répondre à une partie de cette demande d'une façon plus stable au bout des différentes saisons. Si nous traitons ces valeurs en pourcentage, il nous paraît plus clair que pour février, la perte en performance par rapport à un capteur traditionnel en position optimale est la plus faible [Figure 6-28].

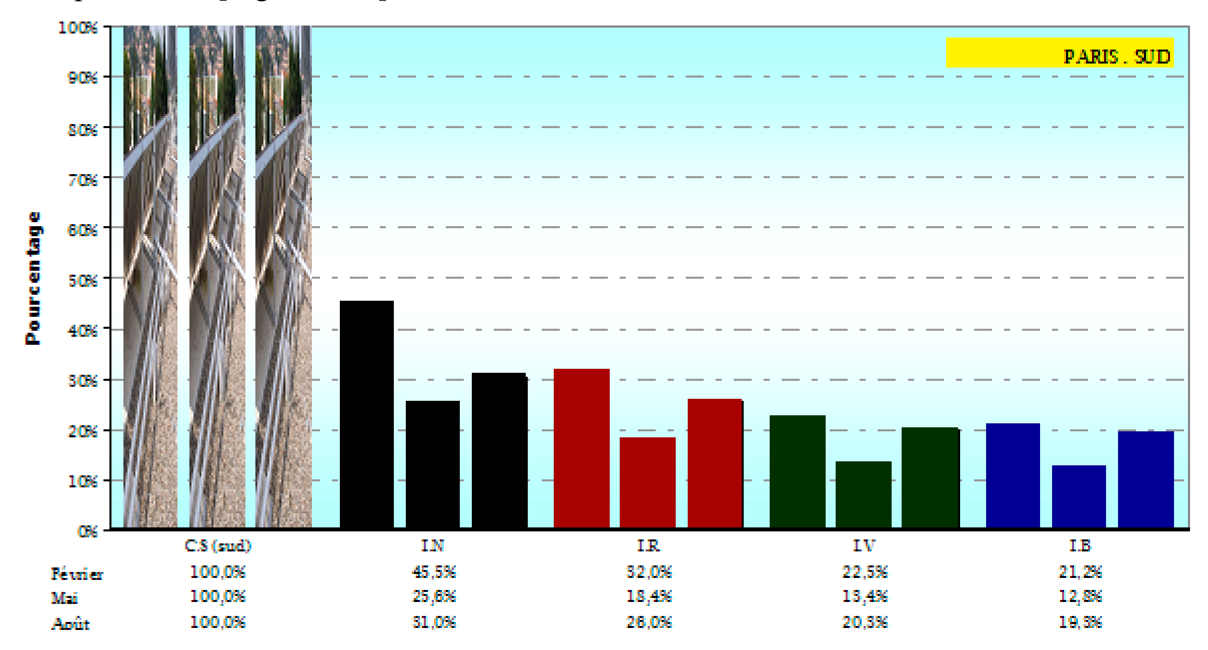


Figure 6-28 : Pourcentage d'énergie utile dans trois mois différents à Paris pour une orientation Sud (az=0°).

En effet, pour février le capteur noir intégré assure 45,5% de la part d'énergie produite par les capteurs de référence, tandis que cette valeur tombe à 31% pour le mois d'août, et à 25.6% pour le mois de mai.

Les résultats de cette série de simulations montrent que le concept d'intégration proposé, avec l'utilisation d'absorbeurs colorés, est pratiquement faisable. En effet, les pertes en performance sont compensées par un faible surcoût et par un gain en intégration. Les surfaces nécessaires pour récupérer la chute en performance sont pratiquement disponibles en façade. Pour la totalité des résultats se référer à l'annexe C-1-1.

6.8.2.2 Deuxième série de simulations

Cette série de simulations est effectuée sur la période d'un an, pour des capteurs ayant comme couleur d'absorbeurs les trois couleurs les mieux classées : Noir chromé, RAL 7021, RAL 6009. Des modules solaires prototypes seront construits avec ces couleurs pour la phase expérimentale. Ainsi le but de cette série est de prédire la performance thermique des prototypes qui seront testés à l'échelle réelle, comme nous verrons dans la dernière partie.

Le système solaire considéré est composé de 14 m² de capteurs et un ballon de stockage de 1000 l. Des simulations sont d'abord effectuées dans le but de calculer la quantité d'énergie utile produite, pour des configurations différentes, et de comparer les résultats à la quantité

d'énergie utile produite par un système de référence traditionnel. Les résultats sont regroupés dans des graphiques qui permettent d'observer la différence entre plusieurs zones climatiques. Ainsi, dans le graphique suivant, sont présentés les résultats des simulations effectuées sur la période d'un an, pour des systèmes solaires installés à Lyon, Paris, Nice, Athènes, Berlin, Stockholm et Lisbonne, avec des capteurs traditionnels et des capteurs intégrés, noirs et colorés, tous orientés vers le Sud [Figure 6-29].

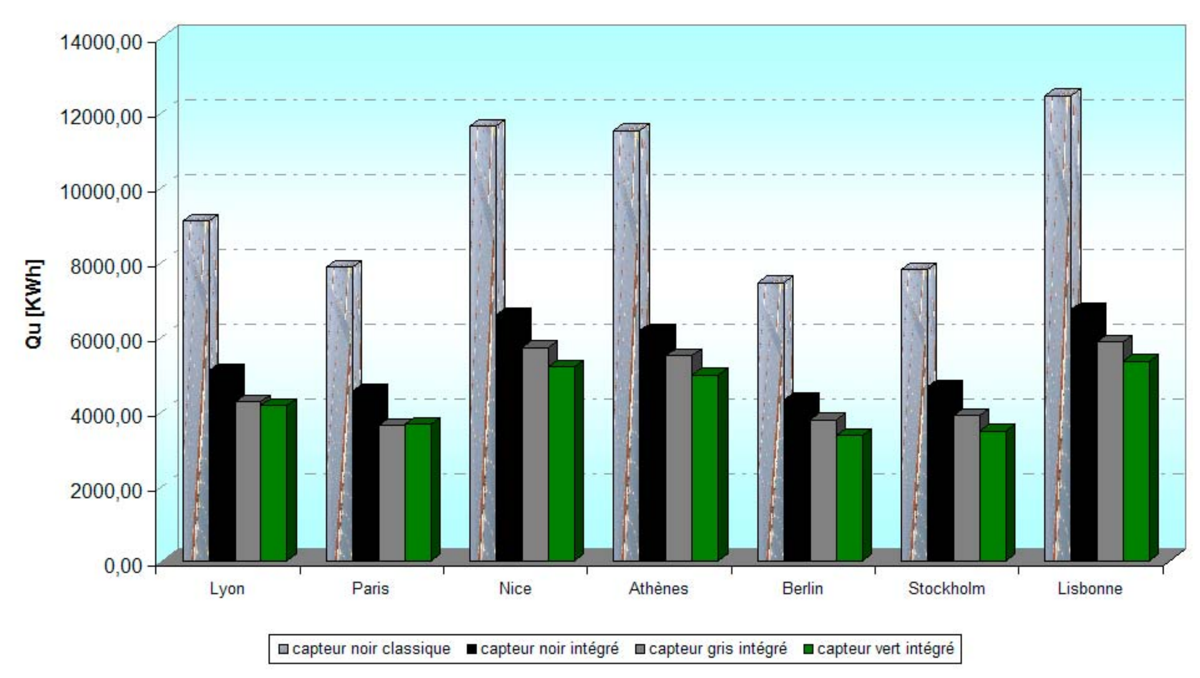


Figure 6-29 : Quantité d'énergie utile des systèmes solaires orientés vers le Sud sans effet de masque (az=0).

En négligeant l'effet de masque, un système solaire avec des capteurs noirs intégrés dans la façade produit une énergie utile de l'ordre de 5088 kWh, contre 9091 kWh pour un système traditionnel, ce qui signifie une perte de 43% de productivité. Cette valeur est du même ordre que la quantité d'énergie utile produite par un système solaire avec des capteurs traditionnels verticaux « non intégrés », auxquels on attribue en moyenne une réduction de performance de l'ordre de 30% par rapport aux capteurs ayant une position optimale [MATUSKA, 2006]. À la différence de ces derniers, les capteurs intégrés sont plus esthétiques, plus acceptés, et probablement moins coûteux : Au prix de la façade vitrée d'origine viennent s'ajouter les prix de l'absorbeur, de l'isolant, du coffre et des conduits, et non plus le prix d'un capteur traditionnel tout fait. De plus, le graphique illustre des résultats importants quant à la couleur de l'absorbeur. En effet, en observant les résultats obtenus pour toutes les villes étudiées, il paraît évident que le comportement des capteurs intégrés avec des absorbeurs colorés (RAL 7021 et RAL 6009) est proche de celui du capteur noir intégré. Pour la ville de Berlin, la production annuelle est de 4297 kWh pour des capteurs noirs intégrés, de 3761 kWh pour des capteurs gris (RAL 7021), et de 3353 kWh pour des capteurs verts (RAL 6009).

Des simulations sont ensuite menées suivant une démarche itérative pour calculer la surface de captage nécessaire aux systèmes avec des capteurs intégrés pour reproduire la même quantité d'énergie fournie par les systèmes de référence. Un ratio de surface est défini pour chaque capteur selon la couleur de l'absorbeur et la ville considérée. Dans la figure suivante, nous présentons et analysons les résultats obtenus pour le cas des systèmes ayant des capteurs orientés vers le Sud, dans les sept villes choisies [Figure 6-30].

Sud sans masque

Figure 6-30 : Ratio de la surface nécessaire des capteurs intégrés sans effet de masque (az=0).

Les résultats montrent que lorsque nous utilisons les éléments solaires intégrés dans la façade, la surface de captage devrait être multipliée en moyenne par 1,80 pour des capteurs noirs intégrés, par 2,10 pour des capteurs gris intégrés, et par 2,25 pour des capteurs verts intégrés. Ces valeurs reflètent que la production de la même quantité d'énergie des systèmes de référence nécessite en moyenne une surface de captage double, et ceci pour les trois couleurs étudiées. Ces valeurs sont encourageantes suivant deux aspects : En premier lieu, le rendement des capteurs intégrés n'est pas trop pénalisé et reste comparable au rendement des systèmes traditionnels. En second lieu, les couleurs ont montré un comportement quasi-semblable à celui des capteurs noirs. Ceci peut contribuer à ouvrir la voie à une industrialisation d'absorbeurs peints avec de nouvelles couleurs différentes de la couleur noire classique, la seule à être commercialiser aujourd'hui. Les architectes et les maîtres d'ouvrage auront ainsi plus d'options dans le choix de composants solaires à installer.

Mais dans un cas réel, il faut tenir compte des effets de masque. Pour cela, des simulations sont menées avec la configuration non favorable présentée précédemment dans le protocole

de simulation. Les résultats pour les sept villes considérées montrent que les ratios de surface de captage varient entre 3,6 et 6 [Figure 6-31].

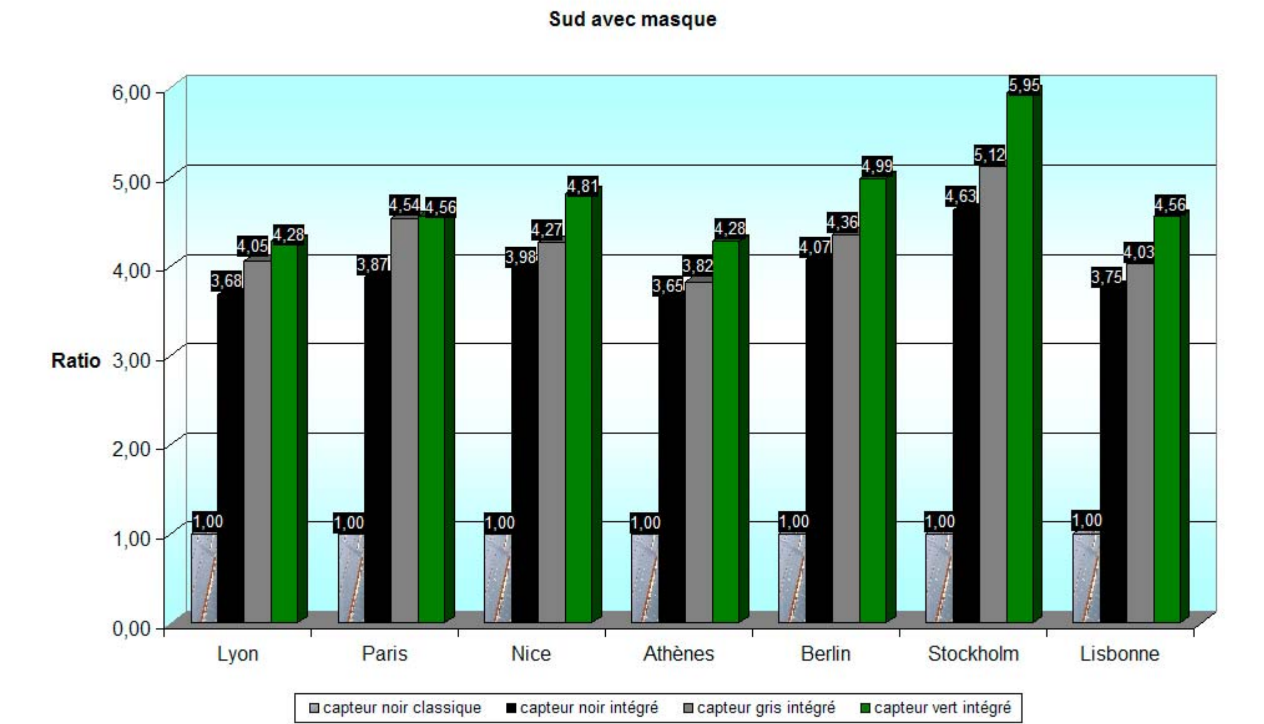


Figure 6-31 : Ratio de la surface nécessaire des capteurs intégrés avec effet de masque (az=0).

En effet, pour Lyon, nous avons besoin d'une surface de capteur gris intégré quatre fois plus grande de la surface de captage d'un système de référence ayant des capteurs posés sur la toiture. Les résultats montrent aussi qu'il sera préférable d'installer les capteurs intégrés dans les parties les plus hautes du bâtiment, afin de limiter l'impact de l'effet de masque provenant surtout des bâtiments avoisinants, et ainsi obtenir de meilleurs rendements.

Dans le contexte environnemental actuel, il nous paraît important d'étudier aussi la contribution de ces systèmes à la réduction annuelle des émissions de CO_2. Suivant l'énergie substituée, sont calculés, en kg par m² de captage, les poids de CO_2 évités lorsque nous installons des systèmes solaires avec des capteurs solaires intégrés. Ainsi, nous avons calculé la quantité de CO_2 évitée à Lyon suivant l'énergie substituée, que ce soit le fioul domestique, le gaz naturel où l'électricité[5] [Figure 6-32].

[5] En France : 78,3% nucléaire, 11,3% de thermique classique, 10,2% hydraulique et 0,2% éolien et photovoltaïque [EDF].

Figure 6-32 : Réduction annuelle des émissions de CO2 par le système solaire thermique.

Les résultats montrent que 164 kg de CO2 /m² de capteur peuvent être évités avec des capteurs noirs intégrés dans la façade du bâtiment, 137 kg de CO2 /m² de capteur avec des capteurs gris intégrés, 134 kg de CO2 /m² de capteur avec des capteurs gris intégrés, lorsque l'énergie substituée est le fuel domestique. Lorsque l'énergie substituée est le gaz naturel, la quantité de CO_2 évitée varie entre 99 kg pour un capteur noir intégré et 81 kg suivant le couleur de l'absorbeur du capteur intégré. Alternativement à l'utilisation de l'électricité, la productivité des capteurs solaires thermiques intégrés permet d'éviter 86 kg de CO2 /m² de capteur pour les capteurs noirs intégrés, 71 kg de CO2 /m² de capteur pour les capteurs gris intégrés, 70 kg de CO2 /m² de capteur pour les capteurs verts intégrés. Pour la totalité des résultats, se référer à l'annexe C-1-2.

6.8.3 Impact sur l'ambiance interne

Après avoir analysé la performance thermique des capteurs solaires thermiques intégrés, nous avons étudié l'impact de leur comportement thermique et de l'impact de leur interactivité avec l'ambiance interne du bâtiment par leur influence sur la température intérieure finale. Des simulations sont menées avec la géométrie du bâtiment décrite dans le protocole de simulation, pour une façade solaire et une façade traditionnelle, pendant deux saisons différentes : une semaine de février (hiver) et une semaine d'août (été). Le système solaire pour la production d'eau chaude considéré est composé, comme précédemment, de 14 m² de capteurs noirs intégrés, reliés à un ballon de stockage de 1000 l. Les résultats sont ensuite analysés pour exploiter l'influence de l'épaisseur de l'isolant du capteur sur la température

intérieure, et pour comparer les résultats des températures influencées par des capteurs intégrés avec ceux d'un bâtiment ayant des façades traditionnelles (U= 0,276 W/m²K).

6.8.3.1 Influence de l'épaisseur de l'isolant du capteur

Il paraît important de voir l'influence de l'isolant du capteur sur la température de l'ambiance interne du bâtiment, afin de définir l'épaisseur la plus adaptée à la proposition d'intégration étudiée. Pour cela, nous considérons plusieurs épaisseurs de l'isolant : e = 30 mm, e = 60 mm, e = 90 mm et e = 120 mm. Les simulations sont d'abord effectuées sur la période du 1er au 7 février. L'éclairement énergétique global sur le plan du capteur intégré vertical dépasse légèrement 700 W/m² le 3 février [Figure 6-33].

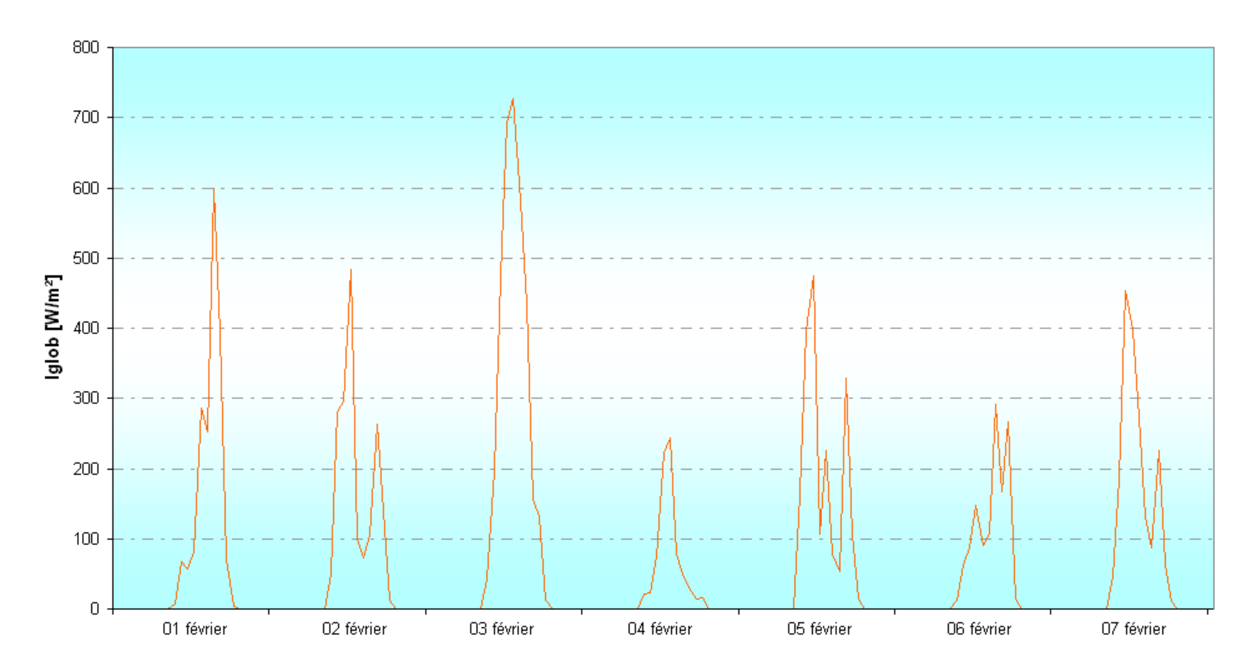


Figure 6-33 : L'éclairement énergétique global sur le plan du capteur à Lyon entre 01 et 07 février.

Sur le graphique suivant, nous avons regroupé les résultats obtenus avec un système solaire en marche, pour les épaisseurs étudiées de l'isolant, ainsi que ceux du bâtiment sans capteur intégré. La température intérieure de la zone étudiée se trouve peu influencée par les différentes épaisseurs considérées [Figure 6-34]. Les profils de températures pour les quatre épaisseurs d'isolant sont très proches et ne diffèrent que peu lorsque l'éclairement énergétique sur le plan du capteur atteint sa valeur maximale.

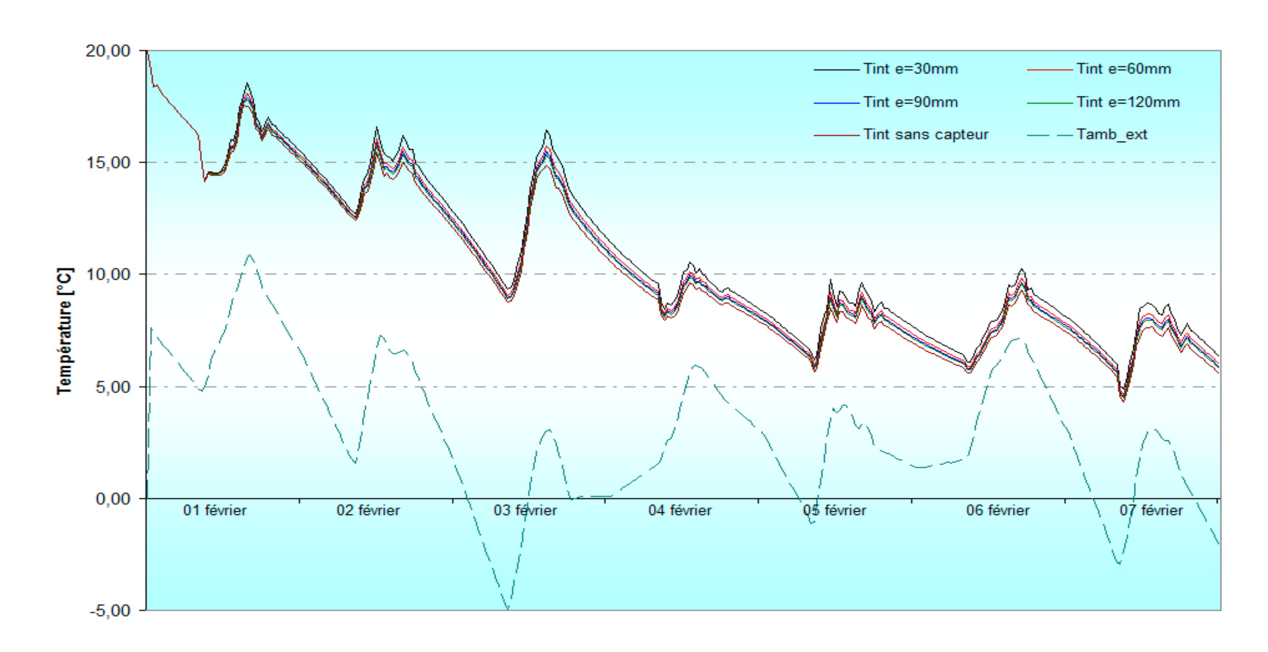


Figure 6-34 : La température intérieure de la zone entre 01 et 07 février avec un système solaire en marche.

Pour analyser plus en détail l'influence de l'épaisseur de l'isolant, nous avons tracé les écarts maximaux des températures intérieures pour les épaisseurs de l'isolant considéré. La Figure 6-35 montre que l'écart maximal atteint 1,1°C pour la journée du 03 février. Donc pour un système solaire en marche, une épaisseur d'isolant de 30 mm, 60 mm, 90 mm ou 120 mm a une faible influence sur l'ambiance interne.

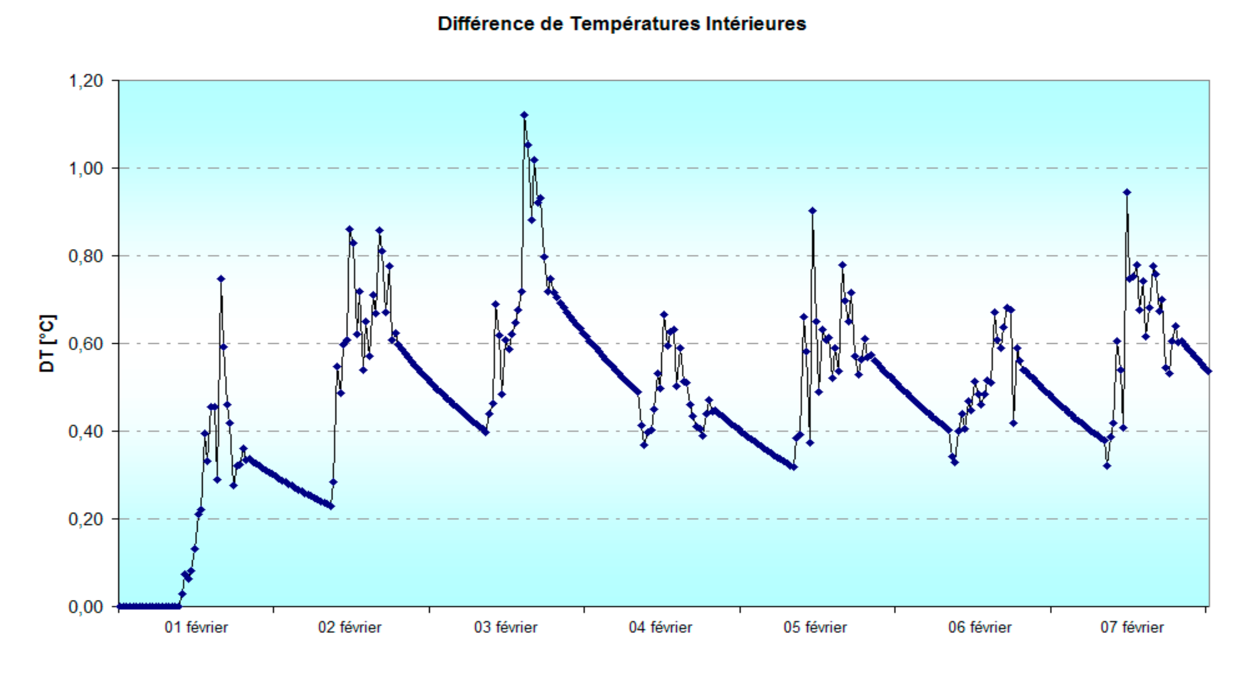


Figure 6-35 : Ecarts maximaux de températures intérieures avec les isolants entre 01 et 07 février avec un système solaire en marche.

Mais il arrive que les capteurs solaires intégrés ne soient pas toujours en marche, et que le système solaire soit en stagnation (par exemple pour une panne dans un composant). Ainsi, nous analysons l'impact de l'épaisseur de l'isolant sur l'ambiance interne lorsque le système

solaire stagne. Les résultats des simulations menées sur la période du 1er février au 7 février montrent que les profils de la température intérieure montrent des écarts plus importants [Figure 6-36]. Donc pour un système solaire en stagnation, une épaisseur d'isolant de 120 mm semble résister le mieux aux pertes thermiques de la face arrière du capteur. Les écarts de températures semblent atteindre des valeurs plus importantes.

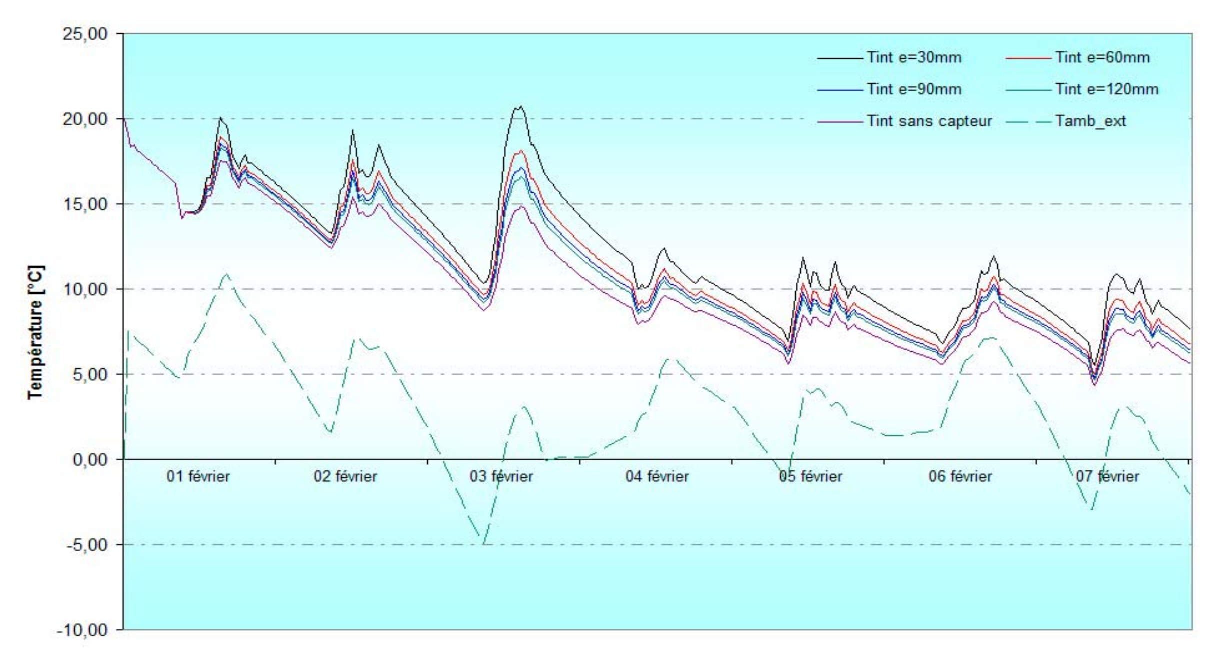


Figure 6-36 : La température intérieure de la zone entre 01 et 07 février avec un système solaire en stagnation.

Les écarts maximaux des températures intérieures dépassent les 4°C pour la journée de 03 février, surtout entre les isolants de 30 mm et 120 mm [Figure 6-37].

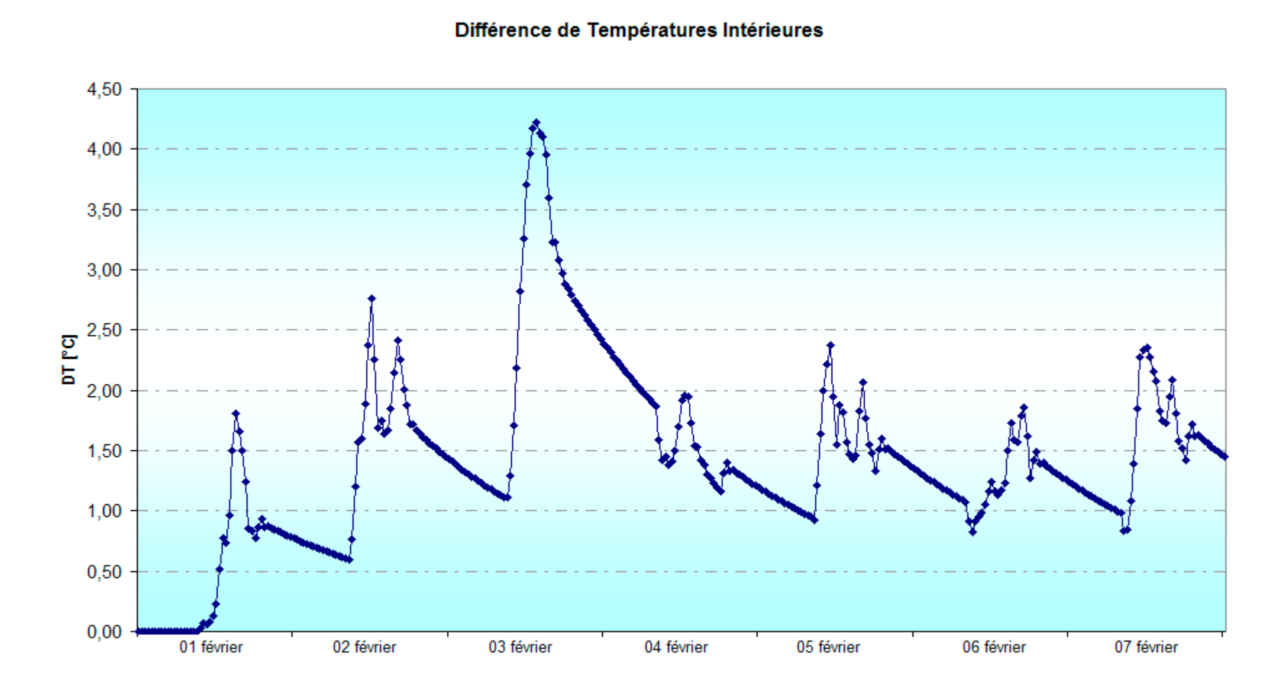


Figure 6-37 : Ecarts maximaux de températures intérieures avec les isolants entre 01 et 07 février avec un système solaire en stagnation.

Donc l'épaisseur de l'isolant du capteur intégré est un élément important à prendre en compte dans la conception de la proposition d'intégration, afin de limiter son influence sur la température intérieure du bâtiment, surtout pendant les périodes de stagnation, et éviter que cette proposition soit une source d'inconfort thermique.

La même étude est ensuite faite pendant l'été, sur une période allant de 01 à 07 août. L'éclairement énergétique global sur le plan du capteur est plus important sur cette période que celui de la période étudiée de février. En effet, l'éclairement énergétique dépasse 500 W/m² durant quatre jours en août, et deux jours en février [Figure 6-38].

Eclairement énergétique global sur le plan du capteur

Figure 6-38 : L'éclairement énergétique global sur le plan du capteur à Lyon entre 01 et 07 août.

Mais même avec un éclairement énergétique plus important, les résultats des simulations sur cette période, pour un système solaire en marche, montrent que l'influence de l'épaisseur de l'isolant du capteur sur la température intérieure de la zone étudiée, est faible. Les profils des températures intérieures obtenues avec les quatre épaisseurs d'isolant sont proches et ne montrent pas des écarts significatifs [Figure 6-39].

La courbe des écarts maximaux entre les différences de la température intérieure, pour les quatre épaisseurs considérées, montre que la différence maximale n'atteint pas les 1,20°C d'écart [Figure 6-40].

Donc, même dans une période bien ensoleillée, l'influence de l'épaisseur est faible lorsque le système solaire est en marche. Et comme pour le cas précédent, nous analysons aussi le cas d'un système solaire en stagnation. Ceci semble mettre plus en évidence l'impact de l'isolant sur la température intérieure.

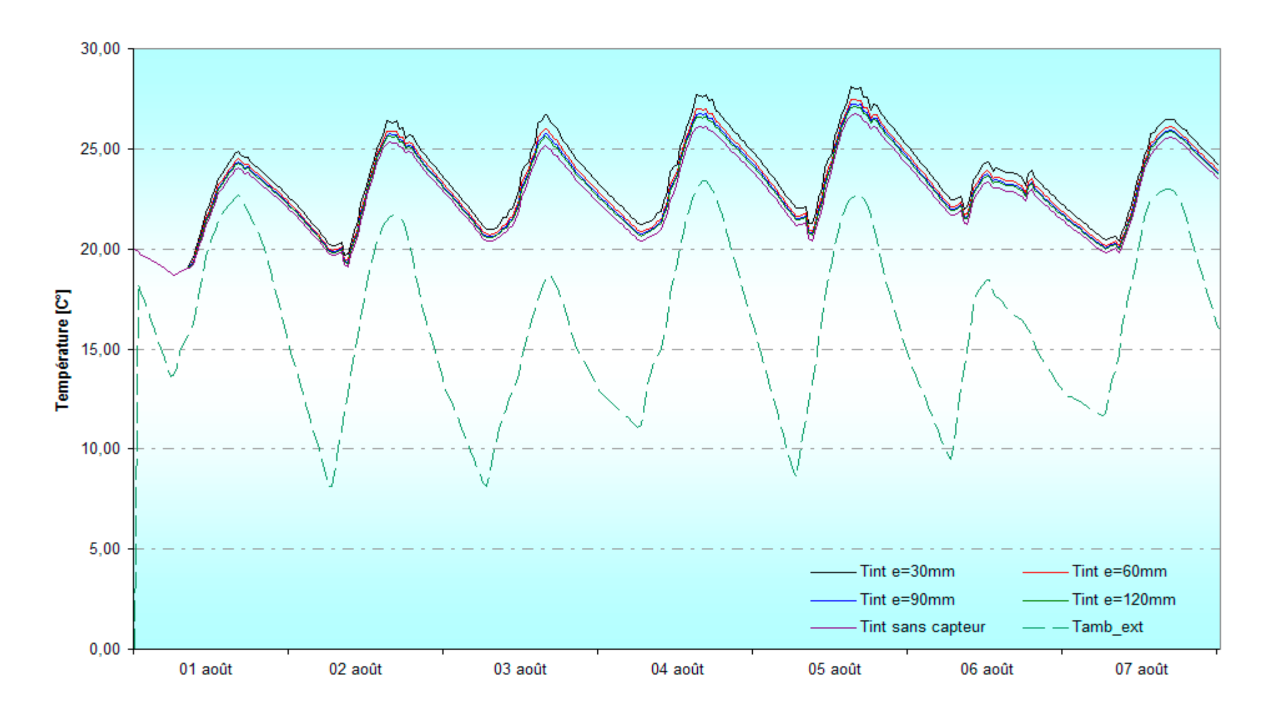


Figure 6-39 : La température intérieure de la zone entre 01 et 07 août avec un système solaire en marche.

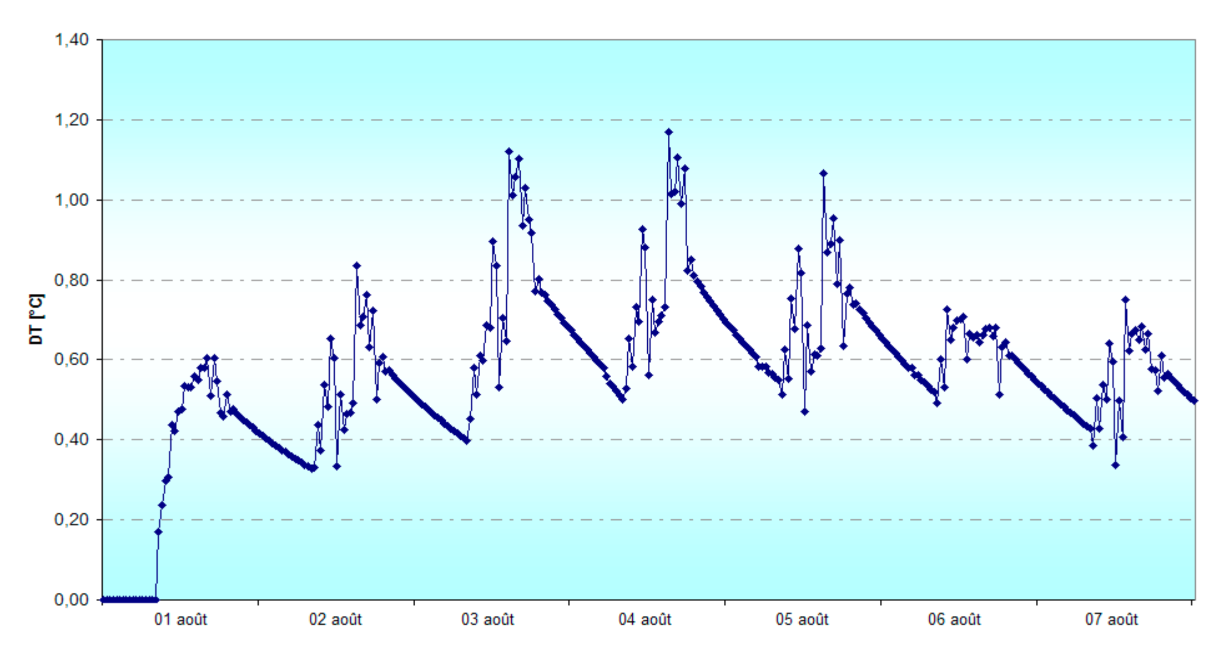


Figure 6-40 : Ecarts maximaux de températures intérieures avec les isolants entre 01 et 07 août avec un système solaire en marche.

Ainsi, lorsque le système solaire stagne pendant la période de 01 à 07 août, la température de surface de l'absorbeur du capteur dépasse 100°C, et les pertes du capteur vers l'intérieur du bâtiment sont plus grandes. Les résultats des simulations montrent que les profils de la température intérieure montrent des écarts importants [Figure 6-41]. L'isolant qui résiste le mieux à la surchauffe est celui qui a une épaisseur de 120 mm.

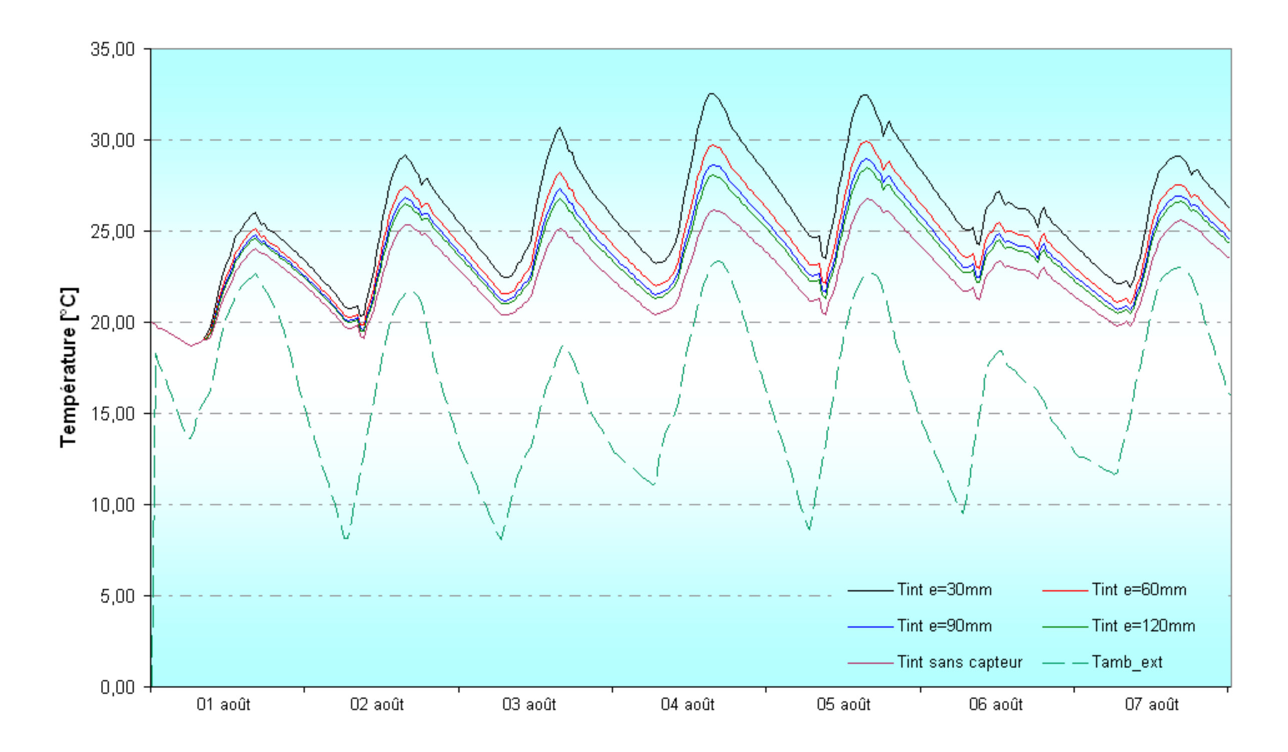


Figure 6-41 : La température intérieure de la zone entre 01 et 07 août avec un système solaire en stagnation.

Les écarts des températures entre les quatre isolants sont importants. Dans la journée du 04 août, la différence de température intérieure avec 30 mm d'isolant et 120 mm dépasse 4,50°C [Figure 6-42]. Cette différence est significative, et illustre l'importance de l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur l'ambiance interne du bâtiment.

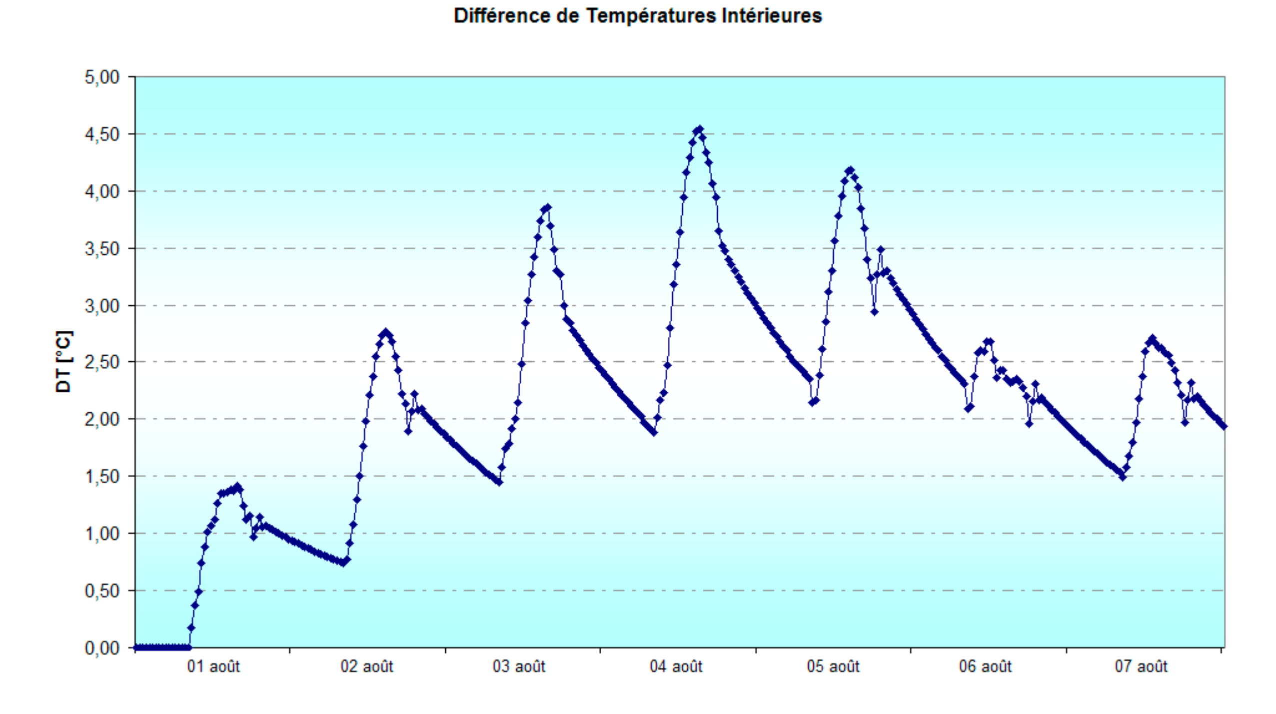


Figure 6-42 : Ecarts maximaux de températures intérieures avec les isolants entre 01 et 07 août avec un système solaire en stagnation.

6.8.3.2 Comparaison avec un bâtiment traditionnel

Après avoir analysé l'impact de l'épaisseur de l'isolant du capteur intégré sur la température intérieure de la zone étudiée, nous avons comparé les résultats obtenus avec des capteurs intégrés dans la façade aux résultats obtenus avec un bâtiment sans capteur intégré. Les comparaisons sont faites en hiver et en été, pour des systèmes solaires en marche et des systèmes en stagnation.

Ainsi, pour un système solaire en marche, l'intégration d'un composant solaire ayant 120 mm d'isolation, ne présente en moyenne que 0,2 °C de différence avec la température intérieure d'un bâtiment sans capteur intégré. Cet écart devient un peu plus important avec 30 mm d'isolation, puisque cet écart peut arriver à 1,6°C le 03 février [Figure 6-43].

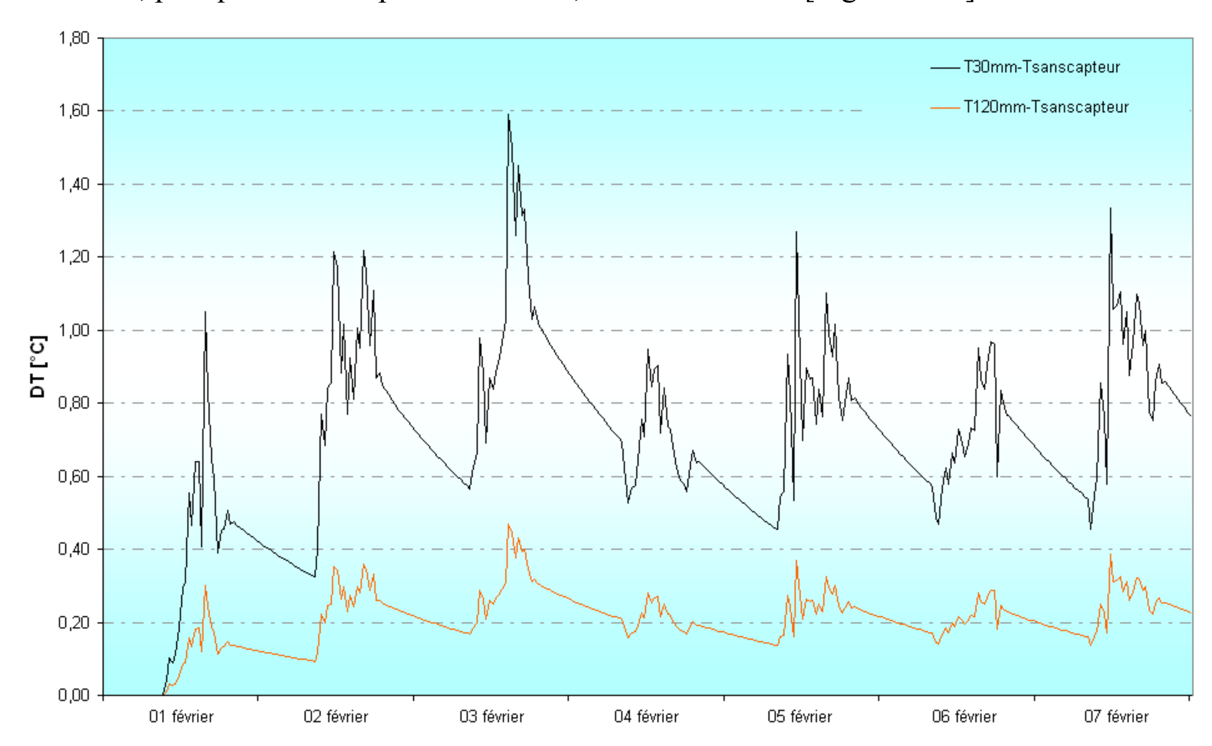


Figure 6-43 : Ecarts entre la température intérieure entre 01 et 07 février dans un bâtiment traditionnel et un bâtiment avec un système solaire en marche ayant de capteurs intégrés.

Les résultats des simulations menées sur la période du 01 au 07 août montrent un comportement similaire. En effet, pour un système solaire en marche, l'intégration d'un composant solaire ayant 120 mm d'isolation, peut causer une augmentation maximale de la température de l'ambiance intérieure de la zone étudiée de 0,5 °C, par rapport à celle d'une zone sans capteur intégré dans la façade. Cette augmentation monte à 1,7°C avec un capteur ayant 30mm d'isolation [Figure 6-44]. Le capteur intégré avec un isolant de 120 mm réduit le mieux les pertes d'énergie en arrière du capteur, vers l'intérieur du bâtiment.

Même si ce résultat semble évident puisque une augmentation de l'épaisseur de l'isolation réduit le transfert de chaleur, l'importance réside dans la détermination de l'épaisseur la mieux adaptée à notre proposition. Ainsi, nous avons montré qu'il suffit d'une épaisseur de

120mm derrière l'absorbeur pour conserver une ambiance interne semblable à celle d'un bâtiment ayant une façade traditionnelle, sans perturber le confort intérieur.

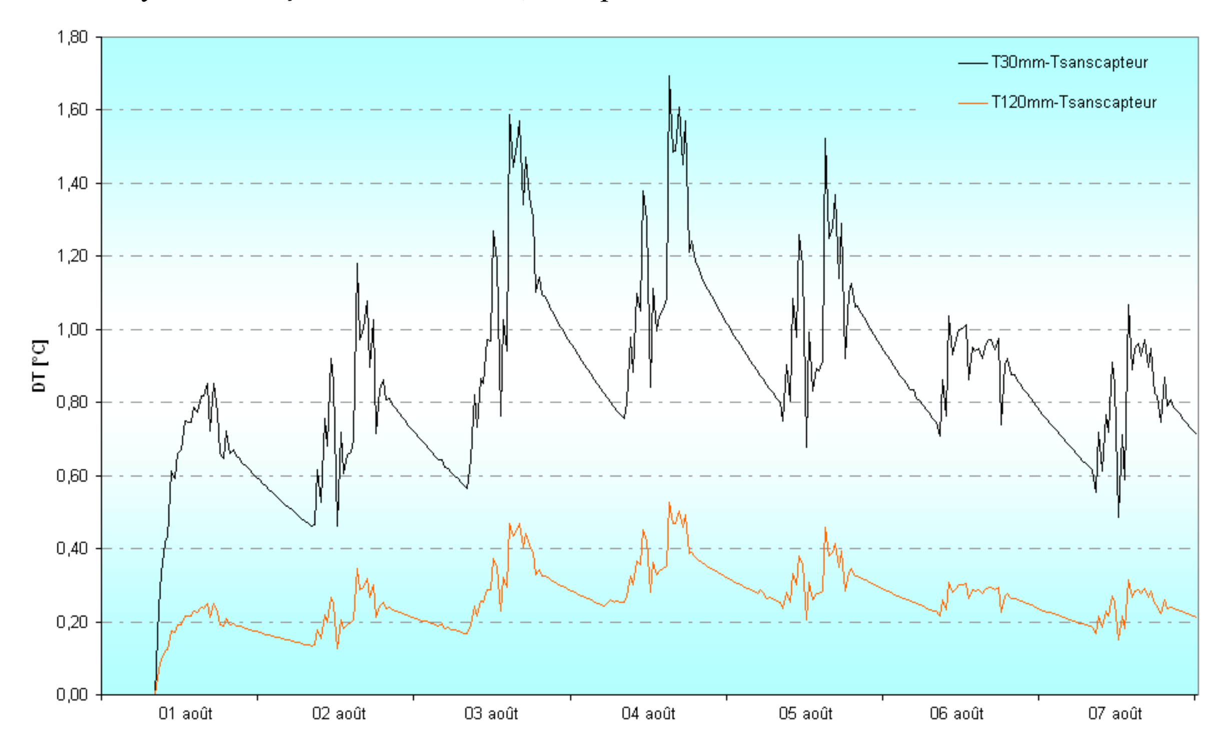


Figure 6-44 : Ecarts entre la température intérieure entre 01 et 07 août dans un bâtiment traditionnel et un bâtiment avec un système solaire en marche ayant de capteurs intégrés.

Cette conclusion se voit renforcée en analysant les écarts des températures correspondant à un système solaire en stagnation pendant les deux périodes considérées.

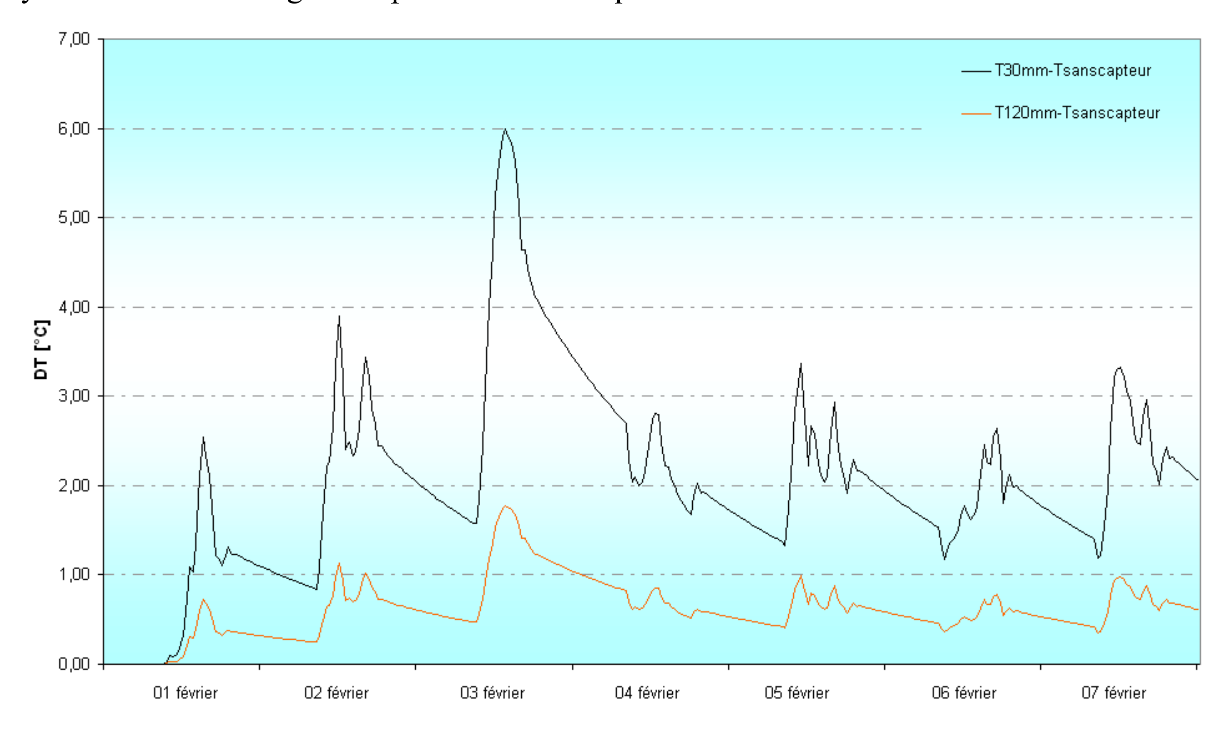


Figure 6-45 : Ecarts entre la température intérieure entre 01 et 07 février dans un bâtiment traditionnel et un bâtiment avec un système solaire en stagnation ayant de capteurs intégrés.

En effet, si nous traçons l'écart entre la température intérieure d'un capteur avec un isolant de 30 mm et un bâtiment traditionnel pour une semaine de février, nous observons que la différence peut atteindre des valeurs importantes de l'ordre de 6°C [Figure 6-45]. Cet écart ne dépasse pas 1,8°C dans le cas d'une isolation de 120 mm, pour un système solaire en stagnation dans une journée bien ensoleillée, où le rayonnement solaire dépasse 700 W/m². Pour ce dernier cas, la valeur moyenne de l'écart est de l'ordre de 0,6°C, ce qui signifie une légère influence sur la température intérieure.
De même pour la période d'été, où le capteur intégré risque d'avoir un impact négatif sur le confort d'été, les résultats montrent que l'écart avec un isolant de 30 mm est très grand et peut avoir un impact très négatif sur le confort [Figure 6-46].

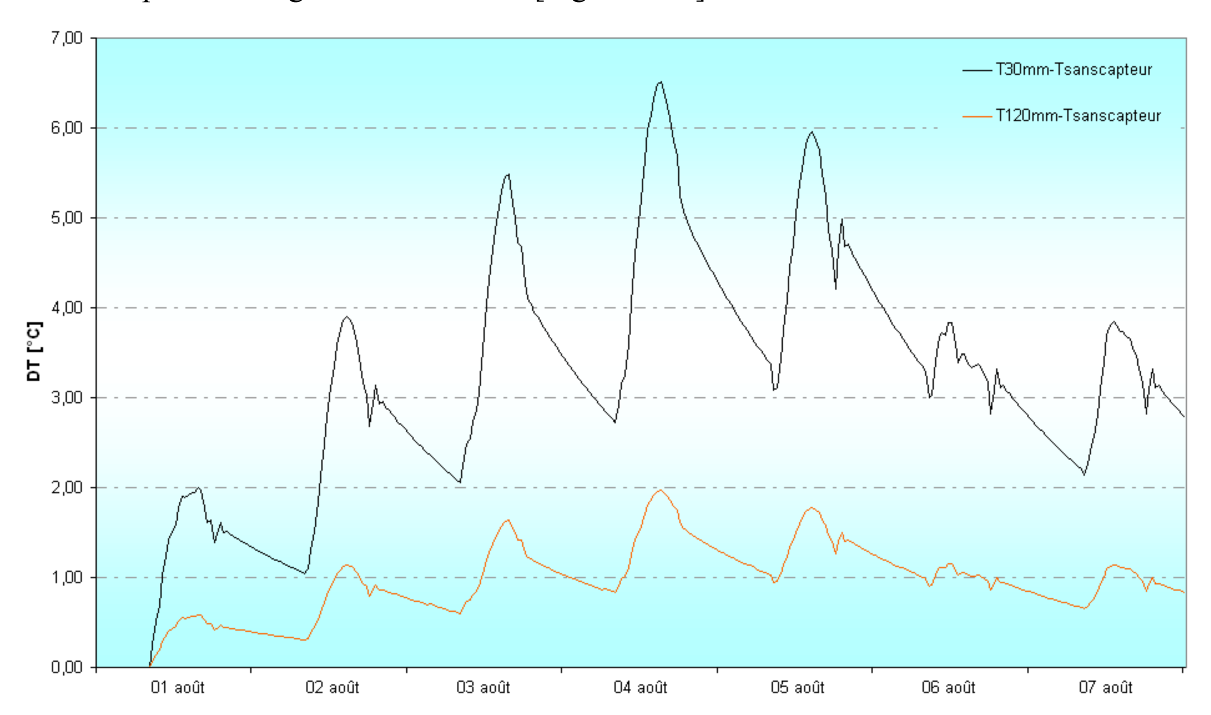


Figure 6-46 : Ecarts entre la température intérieure entre 01 et 07 août dans un bâtiment traditionnel et un bâtiment avec un système solaire en stagnation ayant de capteurs intégrés.

Par contre, avec une épaisseur de 120mm d'isolant, même si la température intérieure peut atteindre 2°C d'écart, cette différence a une valeur moyenne de 0,93°C et a donc un impact négligeable ou acceptable.

Ces résultats permettent de mettre en évidence le rôle que joue l'isolant dans le comportement thermique du composant intégré. Pour chaque proposition d'intégration, une démarche semblable est à suivre afin de déterminer les épaisseurs d'isolant à choisir afin de minimiser l'impact de l'interactivité capteur/bâtiment sur l'ambiance interne de la zone occupée.

6.9 Conclusion

Après le développement d'un modèle numérique et la description des outils informatiques utilisés, nous avons étudié la proposition d'intégration dans la façade à vitrage parclosé, une des six propositions formulées dans la partie précédente.

Un protocole de simulation fut construit, et des simulations sur plusieurs périodes, climats et configurations ont été effectuées. Les résultats des simulations ont pu mettre en évidence plusieurs points.

D'abord, elles ont montré le rôle dominant du coefficient d'absorption de l'absorbeur dans le choix de la couleur de l'absorbeur. Ceci est ensuite confirmé dans les simulations menées dans le but de classer les couleurs de la palette présentée dans le protocole, selon la performance thermique du capteur.

Ensuite, elles ont montré que le comportement des capteurs intégrés colorés est comparable à celui du capteur noir classique, et que les rapports des surfaces nécessaires à la reproduction de la même quantité d'énergie d'une installation traditionnelle sont pratiquement surmontables suivant plusieurs aspects. En effet, la surface est pratiquement disponible dans les façades, par rapport à la toiture. En plus, le surcoût par rapport à la façade traditionnelle viendra surtout de l'intégration de l'absorbeur, de l'isolant et des conduits dans la façade, ce qui devrait en général représenter un investissement bien inférieur à celui de l'achat de modules entiers, et qui seront probablement perceptibles, moins esthétiques, et donc moins acceptés par les architectes, les maîtres d'oeuvre ou les occupants.

Mais le risque d'avoir des grands échanges thermiques entre le capteur intégré et l'ambiance intérieure du bâtiment nous a conduit à effectuer des simulations dans le but d'étudier la variation de la température d'air de la zone occupée derrière le capteur, par rapport à une façade qui ne comporte pas de capteurs intégrés. Les résultats ont permis d'analyser l'impact sur la température et nous ont conduit à estimer l'épaisseur d'isolant la plus adaptée à la solution d'intégration considérée.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont caractéristiques de la solution étudiée. La même démarche pourra être suivie pour toute autre proposition d'intégration afin de mettre en évidence son comportement thermique, étudier son influence sur l'ambiance interne et trouver les solutions qui permettent de réduire cette dernière.

Dans la partie suivante, des prototypes de la proposition étudiée d'intégration, fabriqués et installés sur un bâtiment expérimental, sont étudiés. Les couleurs d'absorbeurs choisies sont celles qui ont montré une performance poche du capteur noir. Une expérimentation est mise en place, et une étude du comportement thermique réel des capteurs intégrés est effectuée.

Chapitre 7 :
Expérimentation de capteurs intégrés en façade

7 Expérimentation de capteurs intégrés en façade

Les objectifs de cette partie s'inscrivent dans la dernière phase de la démarche globale de notre recherche. Il s'agit de mettre en place une expérimentation dans les conditions réelles de prototypes de capteurs solaires intégrés dans une façade vitrée, installés sur site, afin d'étudier le comportement thermique du capteur solaire intégré dans la façade vitrée, et de comparer les mesures aux résultats obtenus par le modèle numérique développé dans la partie précédente. Les composants étudiés ont été conçus et construits lors d'une étude menée dans le cadre de projet « intégration des capteurs solaires dans les éléments de façades » du programme « Préparer le Bâtiment à l'horizon 2010 » lancé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) en association avec Plan Urbanisme Construction et Architecture (PUCA). En tenant compte des normes en vigueur sur le sujet, nous avons choisi les données importantes à étudier et les capteurs de mesure appropriés pour permettre d'évaluer les performances de ces composants prototypes. Tout d'abord, un protocole expérimental est mis en place. Ensuite un programme est développé afin d'assurer l'acquisition des données et la commande de l'installation. Le traitement des données obtenues permet la qualification des performances des capteurs. Ces données sont comparées avec les données obtenues grâce au modèle numérique.

7.1 Lieu de l'installation

Pour tester les capteurs solaires prototypes dans des conditions réelles, l'équipe en charge du projet a dû trouver un site pouvant accueillir une telle expérimentation. Ce sont finalement les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau (GAIA) qui ont été retenus.
Pôle d'enseignement, de recherche et d'expérimentation de la construction, les Grands Ateliers ont été construits en 2001 sur la commune de Villefontaine (Isère).
Les Grands Ateliers, Groupement d'Intérêt Public, ont été crées par onze établissements d'enseignement supérieur et un centre de recherche, et sont soutenus par les Ministères de la Culture et de l'Équipement, ainsi que par des industriels fabricants de matériaux de construction.
Ils ont pour mission de réunir en un même lieu des artistes, des architectes et des ingénieurs, pour, ensemble, concevoir, élaborer et réaliser des modules de formation, des travaux de recherche et des opérations de diffusion de leurs savoirs et savoir-faire dans le domaine des matériaux, de la construction et de la qualité des espaces habités.
Ils sont ouverts aux étudiants, aux enseignants et aux chercheurs des écoles d'art, d'architecture et d'ingénieurs de la France entière, ainsi qu'aux professionnels de la construction et participent à la formation des étudiants inscrits dans les établissements membres, et ce, de manière complémentaire à leurs activités propres.

Le bâtiment s'articule autour de plusieurs grands ensembles [Figure 7-1]:

Figure 7-1 : Coupe transversale (Sud/ Nord) des grands ateliers.

- La couverture : La grande couverture translucide et transparente, réalisée en plaques de polycarbonate supportées par une charpente mixte en métal et bois, est l'élément essentiel du projet, unité sous laquelle se développent tous les espaces abrités du programme, intérieurs ou extérieurs ;
- La grande halle : c'est le cœur du complexe, espace couvert mesurant 30 m de long sur 15 m de large et 8 m de hauteur libre, cette zone est essentiellement utilisée dans les phases de chantier pédagogique et de montage de prototypes de grandes dimensions. Cette grande halle se prolonge à l'extérieur par des plates-formes d'expérimentation, couvertes ou extérieures, qui permettent d'en augmenter la surface de plus de 500 m².
- Le bloc maçonnerie : À l'arrière du bâtiment, sur toute sa longueur, situé entre les espaces d'expérimentation et d'exposition et les zones de stockage, le bloc de maçonnerie comporte au rez-de-chaussée deux ateliers de mise en œuvre, ainsi que les vestiaires des étudiants, les locaux techniques et la cafétéria. À l'étage, les deux grandes salles de cours, les bureaux d'enseignants et l'administration sont protégés des nuisances acoustiques par la masse et l'épaisseur des murs.
- Le stockage : Les matériaux et le matériel nécessaires aux expérimentations sont entreposés dans des racks constitués d'une ossature et de bardage métalliques, offrant des possibilités de stockage sur plusieurs niveaux tout en assurant la protection et la sécurité indispensables.
- La façade : Élément d'expérimentation à part entière, elle est constituée d'une ossature métallique légère, suspendue à la charpente de la grande halle. Cette conception permet d'intégrer et de tester les caractéristiques des différents matériaux mis en place dans ces caissons démontables. Cette façade étant en effet exposée au Sud/Sud-ouest (azimut 45°), elle bénéficie d'une exposition solaire satisfaisante pour notre expérimentation.

Ce site s'est révélé tout à fait approprié au test de capteurs prototypes. La façade expérimentale possède une orientation quasiment idéale pour des capteurs solaires, elle est par ailleurs démontable et peut tout à fait jouer le rôle d'une façade d'immeuble ou d'équipement public. De plus les accès au site et à l'installation ne posent aucun problème étant donné les activités du bâtiment. Toutefois ces conditions ne sont pas vraiment réelles : en effet le bâtiment n'est pas un immeuble quelconque, il s'agit d'un bâtiment d'expérimentation, il est ainsi difficile d'avoir un retour afin de savoir comment sont perçus les capteurs par les occupants des lieux, par ailleurs l'eau chaude produite n'est pas utilisée dans des conditions réelles. De plus les conditions d'ambiance ne sont pas réelles. Mais ces limites ne sont pas rédhibitoires pour notre expérimentation.

7.2 La Façade

La façade Sud/Sud-ouest est composée de panneaux démontables. Il a donc été possible d'installer les composants thermiques solaires à tester sur cette façade.

Une étude préalable a été nécessaire afin de déterminer l'ensoleillement de la façade tout au long de l'année. La façade est divisée en trois trames et chaque trame a été étudiée pour connaître son ensoleillement. En effet, la couverture située au niveau du toit joue le rôle de masque [Figure 7-2].

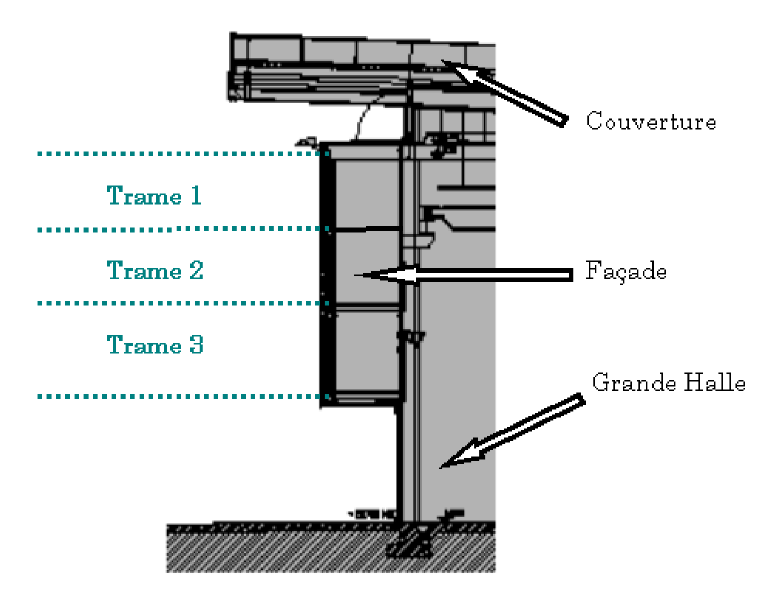
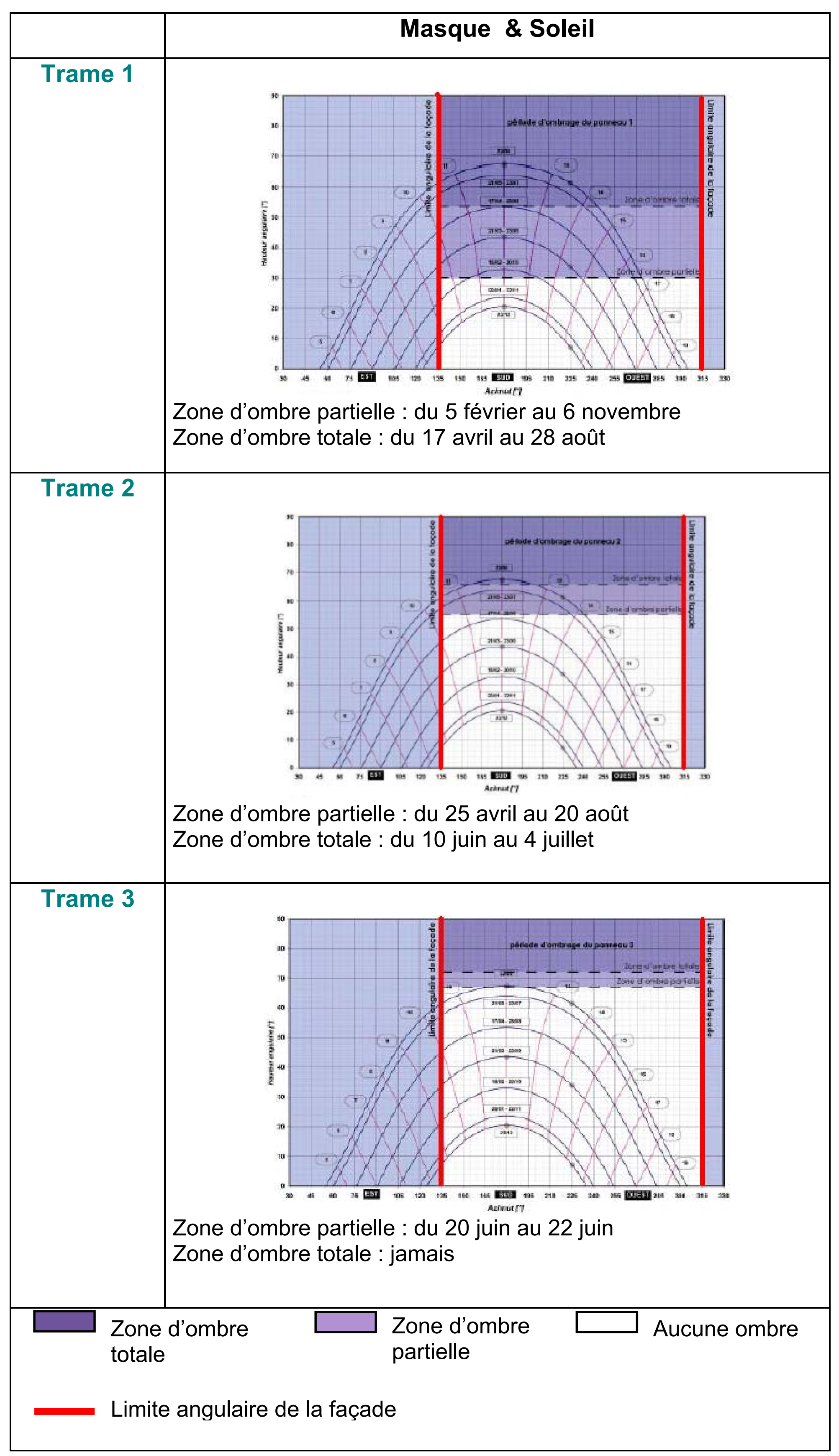


Figure 7-2 : Coupe transversale de la façade

Les résultats obtenus en ce qui concerne l'ensoleillement sont traduits sur les diagrammes solaires suivants [Figure 7-3]:



	Masque & Soleil
Trame 1	Zone d'ombre partielle : du 5 février au 6 novembre Zone d'ombre totale : du 17 avril au 28 août
Trame 2	Zone d'ombre partielle : du 25 avril au 20 août Zone d'ombre totale : du 10 juin au 4 juillet
Trame 3	Zone d'ombre partielle : du 20 juin au 22 juin Zone d'ombre totale : jamais

Légende : Zone d'ombre totale — Zone d'ombre partielle — Aucune ombre — Limite angulaire de la façade

Figure 7-3 : Etude de l'ensoleillement de la façade des GAIA [Projet ICSF].

La position la plus adaptée pour installer les capteurs solaires est donc naturellement au niveau de la trame 3 : en effet les capteurs pourront ainsi profiter d'un ensoleillement maximum avec une zone d'ombre partielle seulement 2 jours dans l'année [Figure 7-4].

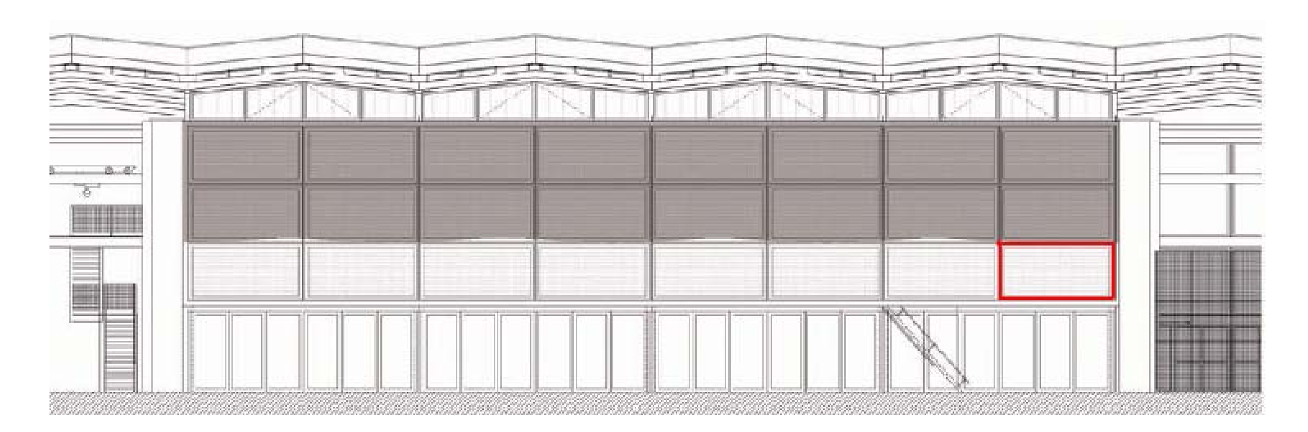


Figure 7-4 : Emplacement choisi pour implanter les composants solaires.

7.3 Les capteurs thermiques solaires

Les capteurs solaires sont fabriqués par les entreprises Giordano Ind. et A.S. Technal (partenaires du projets). Ces capteurs sont innovants par plusieurs aspects : ils ont été réalisés pour être intégrés en façade alors que les capteurs produits jusqu'à maintenant étaient fait soit pour être posés sur une toiture terrasse soit intégrés dans un toit. Par ailleurs plusieurs prototypes ont été réalisés afin de pouvoir tester l'influence des couleurs d'absorbeurs sur les performances des composants. Enfin le module solaire est composé de deux parties : l'absorbeur solaire en partie basse et une fenêtre vitrée en partie haute.

Ces capteurs ont les mêmes caractéristiques techniques que les capteurs C8S produits industriellement par l'entreprise Giordano, mais les dimensions sont légèrement modifiées afin de s'adapter à la façade [Tableau 7-1].

Modèle	C8S classique	Capteur expérimental
Surface	2 m^2	2,01 m^2
Dimensions		
Longueur	2,00 m	1,78 m
Largeur	1,05 m	1,13 m
Nombre d'ailettes	20	20

Tableau 7-1 : Comparaison entre les capteurs C8S et les prototypes.

L'absorbeur est entièrement en cuivre, il est constitué d'ailettes soudées sur des tubes, ces tubes verticaux ont un diamètre de 8 mm et sont soudés en haut et en bas du capteur à des tubes horizontaux jouant le rôle de collecteur dont le diamètre est de 22 mm [Figure 7-5].



Figure 7-5 : Photo de l'un des trois capteurs solaires avec mise en place des sondes.

Le fluide caloporteur utilisé est l'héliogel CS8O, il est à base de monopropylène glycol et d'inhibiteurs de corrosion. Il assure une protection efficace contre le gel (-25°C) et contre la corrosion des métaux présents dans les circuits. Le mouvement du fluide s'effectue de bas en haut : le fluide caloporteur « froid » entre dans le capteur par le bas et ressort par le haut « chaud » [Figure 7-6].

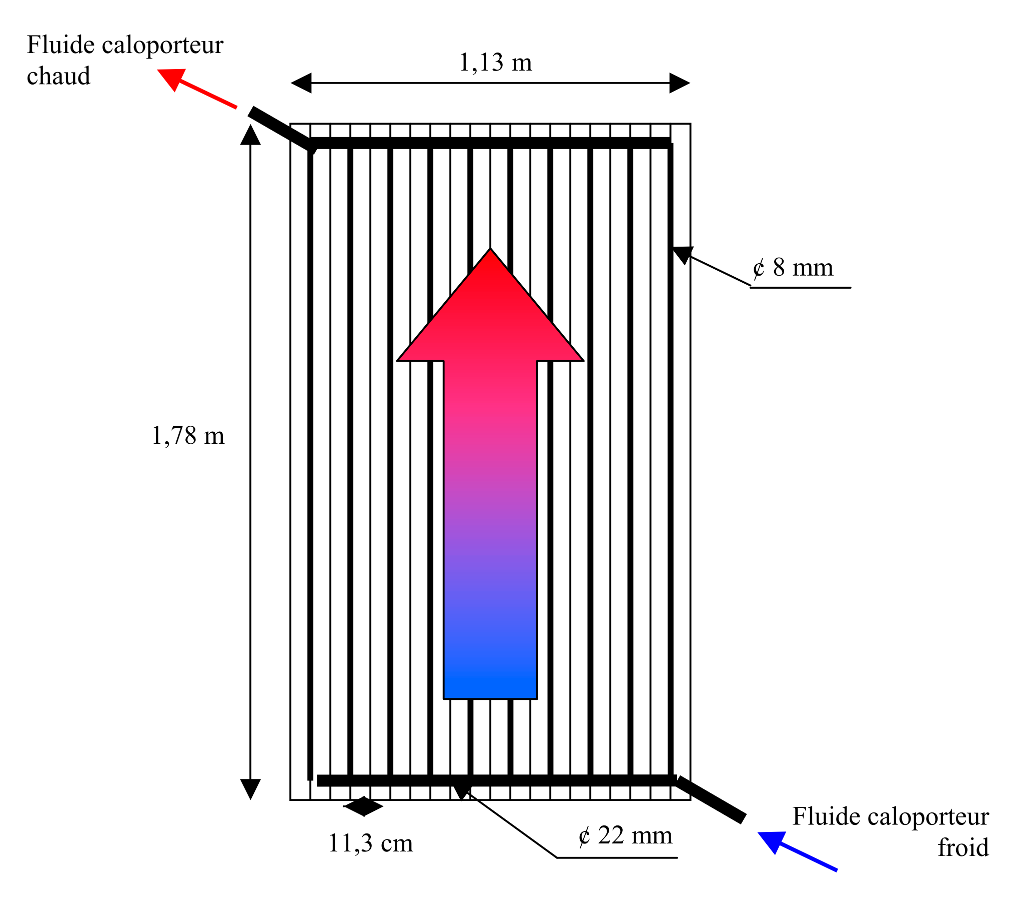


Figure 7-6 : Circulation du fluide caloporteur dans le composant thermique solaire.

L'entreprise A.S. Technal a réalisé l'enveloppe du capteur afin de permettre l'incorporation du composant dans la façade. Cette enveloppe se décompose en deux parties : d'une part le capteur, positionné au niveau de la trame 3 et d'autre part une partie vitrée équipée d'un store au niveau de la trame 2 [Figure 7-7]. Cette enveloppe peut ainsi s'intégrer réellement dans une façade d'immeuble par exemple.



Figure 7-7 : Schéma des capteurs solaires de façade.

La partie vitrée (partie supérieure de chacune des trois enveloppes) est composée d'une vitre extérieure, puis d'un store et enfin d'un double vitrage intérieur.

Trois prototypes de capteurs ont été réalisés par l'entreprise Giordano et installés par la suite sur le site des Grands ateliers [Figure 7-8].



Figure 7-8 : Photo de l'installation sur site.

Le capteur ouest constitue la référence : le cadre du panneau et l'absorbeur sont noirs, son revêtement sélectif est assuré par anodisation à base de chrome noir. Ce sont les couleurs et les matériaux classiquement utilisés par Giordano. Les deux autres capteurs possèdent les couleurs d'expérimentation : le composant du centre est revêtu d'une laque RAL 7021 (gris) et celui à l'est est laqué RAL 6009 (vert brun). De ce fait les coefficients d'absorption (α) et d'émissivité (ε) de chacun des absorbeurs sont différents. Or ces coefficients reflètent les performances des capteurs solaires : en effet les performances des absorbeurs sont meilleures si le coefficient α est élevé et le coefficient ε est faible [Tableau 7-2].

Absorbeur	**Coefficient d'absorption α**	**coefficient d'émissivité ε**
Noir	95,6	7,7
RAL 7021 (Gris noir)	95	86
RAL 6009 (Vert brun)	94	95

Tableau 7-2 : Coefficients α et ε des différents absorbeurs.

L'isolation est aussi différente selon les enveloppes : pour les deux panneaux aux extrémités (capteurs noir et vert) le panneau isolant possède une épaisseur de 130 mm et est composé de 2 tôles en aluminium prenant en sandwich. de la laine de roche, pour le caisson au centre (capteur gris) il s'agit d'une tôle acier avec de la laine de verre de 120 mm. Ce choix a été fait pour les besoins de l'étude industrielle.

7.4 L'installation d'eau chaude sanitaire

L'installation solaire étant composée de trois capteurs aux propriétés différentes, il aurait été souhaitable d'avoir trois installations d'eau chaude disjointes. Il aurait alors été possible de comparer directement les performances des différents capteurs. Mais réaliser une telle installation aurait été techniquement difficile. Il existe en effet un problème de manque de place pour installer le matériel, et un risque de surcharge imposée au plancher devant supporter les ballons de stockage. Il a donc été décidé d'installer un unique ballon relié aux trois composants. Ce ballon de 150 litres est équipé d'un échangeur serpentin permettant le transfert d'énergie du fluide caloporteur à l'eau. Le fluide caloporteur en provenance des capteurs solaires pénètre dans le ballon à mi-hauteur et ressort en bas de ce dernier.

Dans une installation fonctionnelle, l'eau chaude est tirée en haut du ballon et l'eau froide revient par le bas du ballon. Pour effectuer une vidange du ballon dans ces conditions, il aurait fallu installer une pompe pour extraire l'eau. Pour des raisons de commodité il a donc été décidé de réaliser la vidange par le bas du ballon [Figure 7-9]. Il conviendra dans un futur travail de vérifier l'influence de ce choix sur la stratification du ballon de stockage.

Cette vidange peut être effectuée de deux manières: une électrovanne tout ou rien et une vanne manuelle ont été installées en parallèle permettant soit une vidange commandée soit une vidange manuelle. L'électrovanne installée est une électrovanne tout ou rien normalement

fermée dont le diamètre de passage est de 10 mm. Cette électrovanne a la particularité de fonctionner sans pression différentielle et est anti-coup de bélier. Elle est alimentée en 230V en courant alternatif [Figure 7-10].

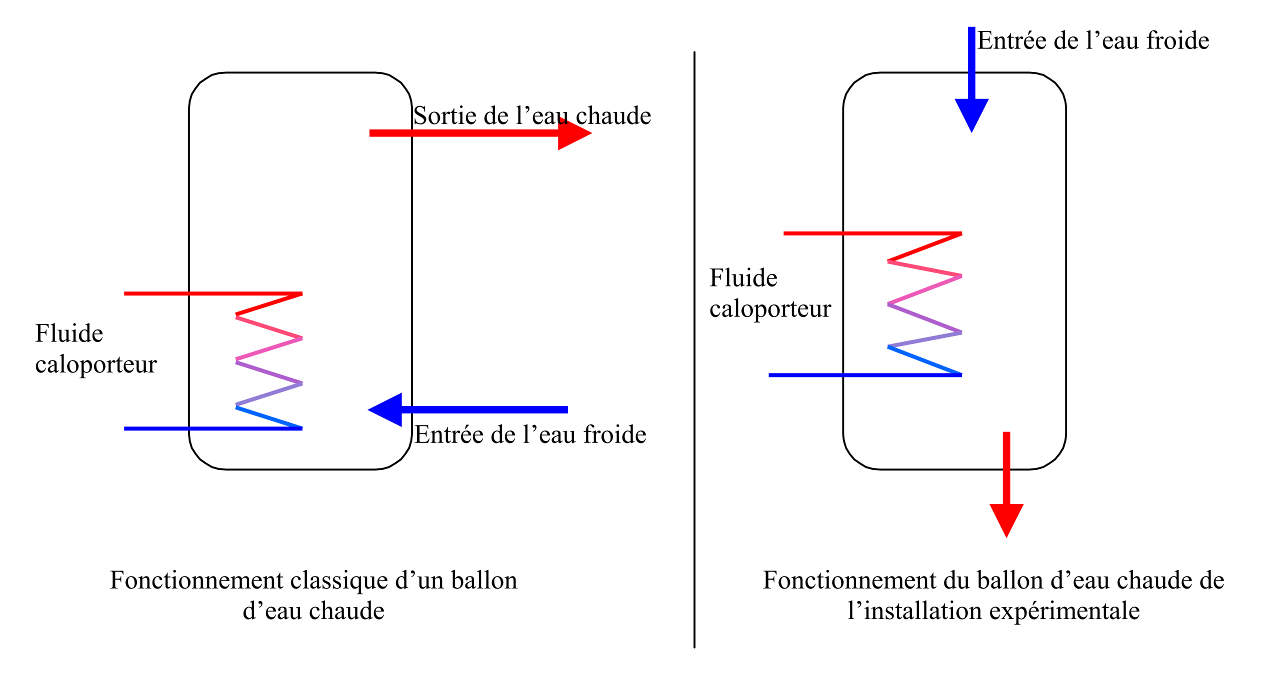


Figure 7-9 : Fonctionnement des ballons d'eau chaude sanitaire

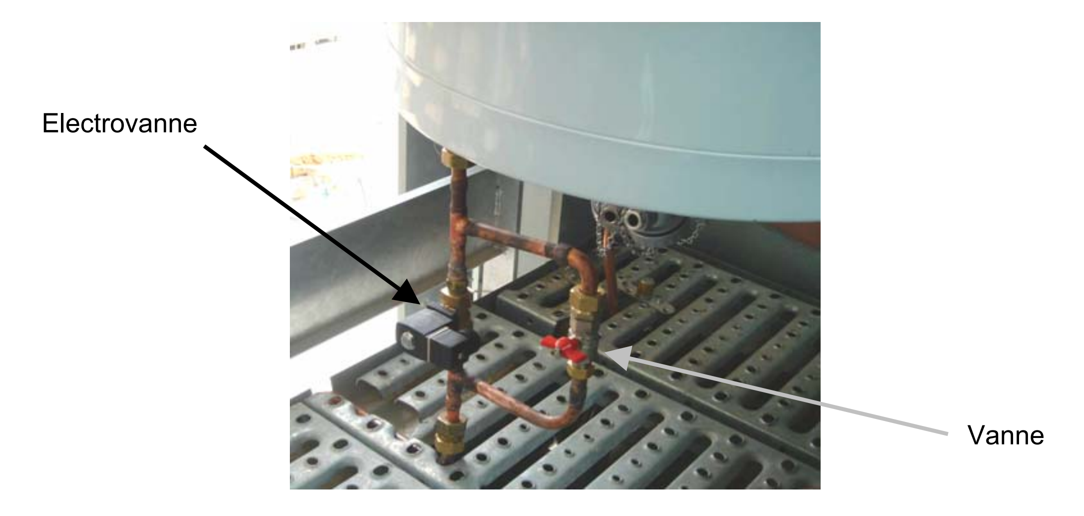


Figure 7-10 : Système de vidange du ballon par électrovanne.

Pour permettre l'étude séparée des capteurs et ainsi comparer leurs performances, des vannes d'isolement ont par ailleurs été placées en amont et en aval de chacun d'entre eux. Des vases d'expansion ont aussi été installés en bas de chaque composant afin d'éviter des surpressions [Figure 7-11].

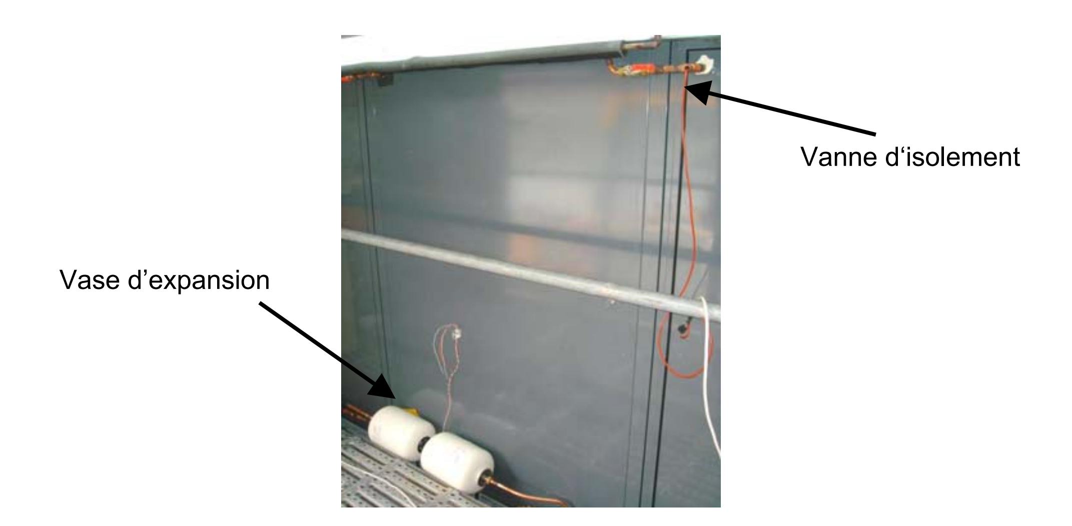


Figure 7-11 : La face arrière des capteurs solaires intégrés dans la façade.

Enfin pour assurer la circulation du fluide caloporteur dans les capteurs, un groupe de transfert a été installé [Figure 7-12].

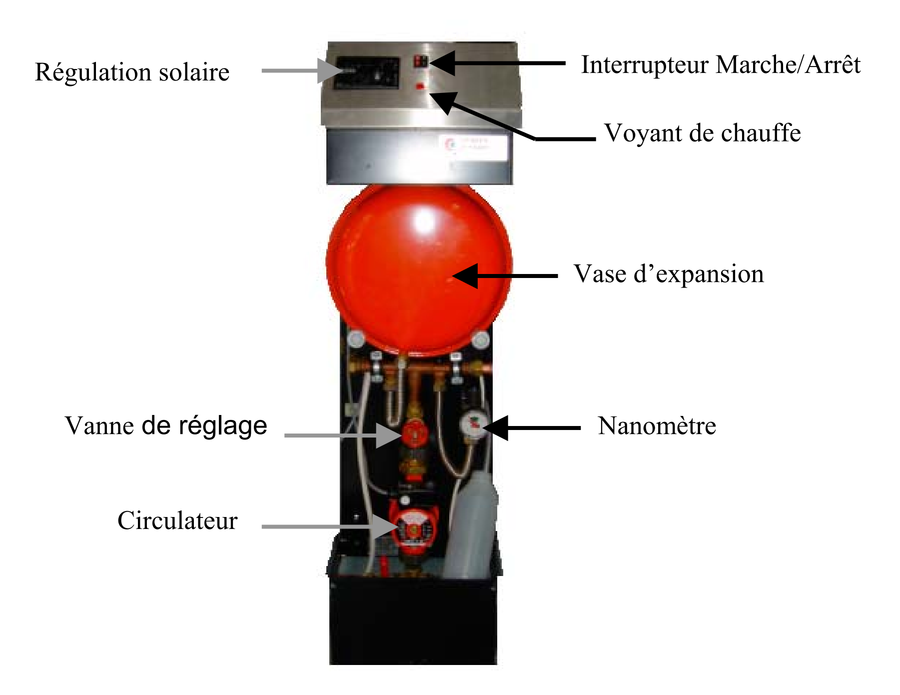


Figure 7-12 : Photo du groupe de transfert.

Il est composé de plusieurs éléments :

- une régulation solaire, qui permet la mise en route du circulateur, la signalisation d'éventuelles anomalies de fonctionnement et la limitation de la température dans le ballon d'eau chaude ;
- un circulateur, qui permet la circulation du liquide caloporteur entre les capteurs et l'échangeur du ballon ;
- un vase d'expansion, qui permet de maintenir le circuit primaire en pression constante ;

- une sonde capteur (câblage rouge en silicone) qui doit être glissée dans le doigt de gant en haut des capteurs ;
- une sonde ballon (câble gris PVC) qui doit être placée dans le doigt de gant sur le tube départ, au plus près du ballon.

7.5 Les capteurs de mesure expérimentaux

7.5.1 Le choix des paramètres de mesure

La norme AFNOR NF EN 12976-2 (actuellement en cours de rédaction et d'approbation) concerne les installations solaires thermiques et leurs composants. Cette norme permet de caractériser les différentes performances des composants. Pour être aux normes un capteur doit répondre à des critères très précis dans onze domaines distincts :

- Caractérisation du produit antigel ;
- Protection contre les températures supérieures ;
- Résistance à la pression ;
- Contamination de l'eau ;
- Protection contre les éclairs ;
- Équipements de sécurité ;
- Marque ;
- Caractérisation des performances thermiques ;
- Capacité à couvrir les besoins ;
- Protection contre les écoulements inverses ;
- Sécurité électrique.

Cette norme expose les techniques qui doivent être mises en place ainsi que le matériel à utiliser pour vérifier l'ensemble de ces caractéristiques.
Dans notre cas il ne s'agit pas d'homologuer un capteur mais de connaître son comportement. En effet le but est de comparer les performances des capteurs expérimentaux à des capteurs classiques. Les principales préoccupations concernent donc les températures. Nous nous intéressons à plusieurs types de températures : tout d'abord aux températures de surface des composants solaires (températures d'ailettes) puis aux températures de conduit des composants et du ballon. Un débitmètre fut installé dans la suite afin de connaître le débit du fluide caloporteur au sein de l'installation. Enfin la température ambiante et les conditions climatiques doivent aussi être connues afin de pouvoir interpréter les résultats obtenus.
Ainsi chaque capteur a été minutieusement choisi selon la fonction qu'il devait assurer. Ils sont dans la suite présentés en fonction du rôle qu'ils tiennent.

7.5.2 La température de surface

Pour connaître les températures d'ailette à l'intérieur des composants thermiques solaires, nous avons choisi d'installer des sondes de température avec un élément sensible platine 100

ohms. L'enveloppe de l'élément sensible est en caoutchouc de silicone et ces sondes fonctionnent dans un domaine de température compris entre –50°C et +150°C.
Sur chaque capteur deux sondes de températures de surface ont été installées sur les ailettes à l'intérieur de l'absorbeur [Figure 7-13].



Figure 7-13 : La sonde de surface installée sur une ailette de l'absorbeur.

Sur chaque capteur, deux sondes de températures de surface ont été installées à l'intérieur de l'absorbeur, sur les ailettes [Figure 7-14].

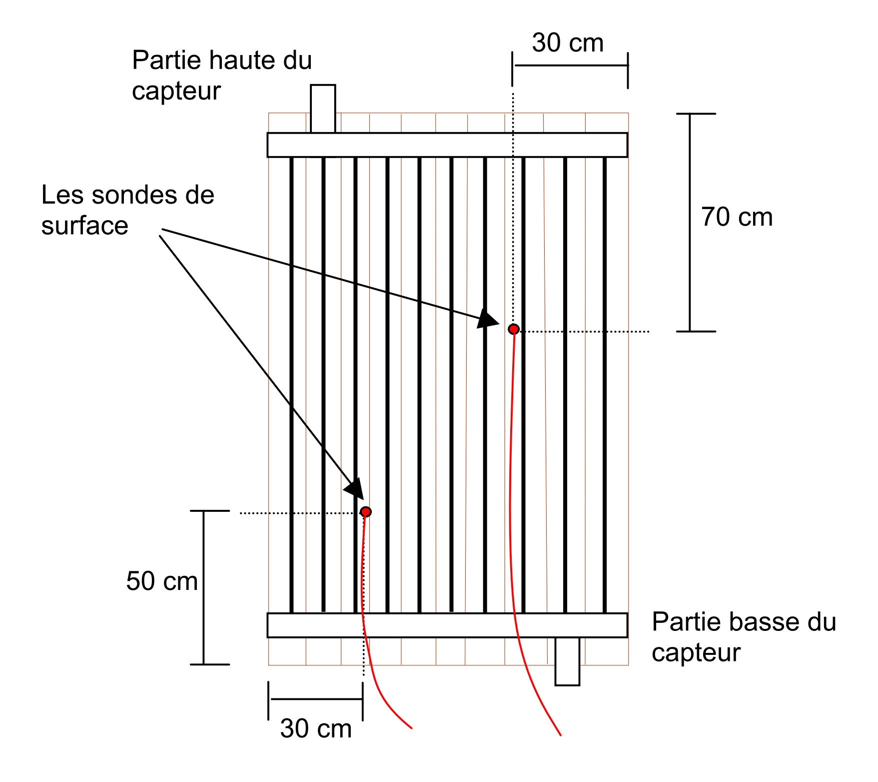


Figure 7-14 : Emplacement des sondes de surface sur chaque capteur.

7.5.3 La température de conduit

Les sondes de température de conduit sont composées de gaines rigides inox. L'élément sensible platine 100 ohms, positionné à l'extrémité de la gaine, a une longueur de 10 mm. Le domaine de fonctionnement en température de cette sonde est compris entre -75°C et +350°C. La sortie sur tête légère en aluminium permet de raccorder les câbles, l'étanchéité étant assurée par le joint de couvercle et par le presse-étoupe fourni [Figure 7-15].

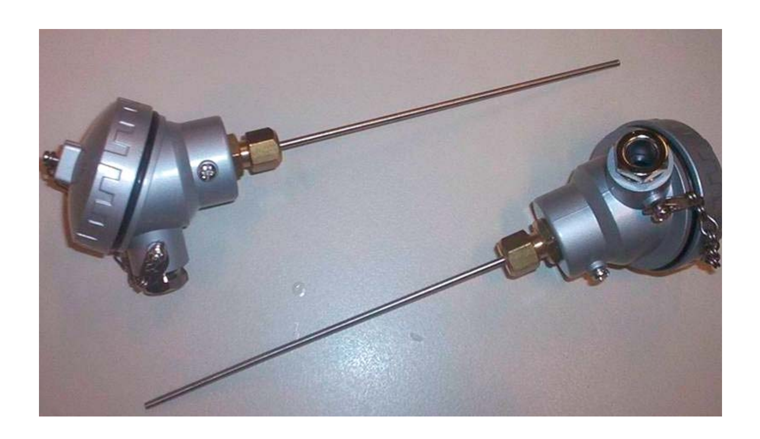


Figure 7-15 : Les sondes de température de conduit.

Deux types de sondes ont été utilisés: les unes pour connaître la température dans les conduits des capteurs, les autres pour connaître la température au sein du ballon [Tableau 7-3].

Caractéristiques des sondes	**longueur**	**Diamètre**
Température de conduit ballon	50 mm	6mm
Température de conduit capteur	15mm	3mm

Tableau 7-3 : Caractéristiques des différentes sondes.

Les sondes utilisées pour mesurer la température dans les conduits des capteurs solaires sont placées dans des doigts de gants [Figure 7-16]. Elles nous permettent ainsi de connaître la température du fluide chaud, c'est à dire en sortie de capteur mais aussi la température du fluide froid en sortie de ballon, après l'échangeur.



Figure 7-16 : Sonde de température de conduit dans un doigt de gant des différentes sondes.

Les sondes de température au sein du ballon ont été placées à la base de la cuve. Les trois sondes ont été placées à des hauteurs différentes afin d'analyser l'homogénéité de la température de l'eau dans le ballon [Figure 7-17].

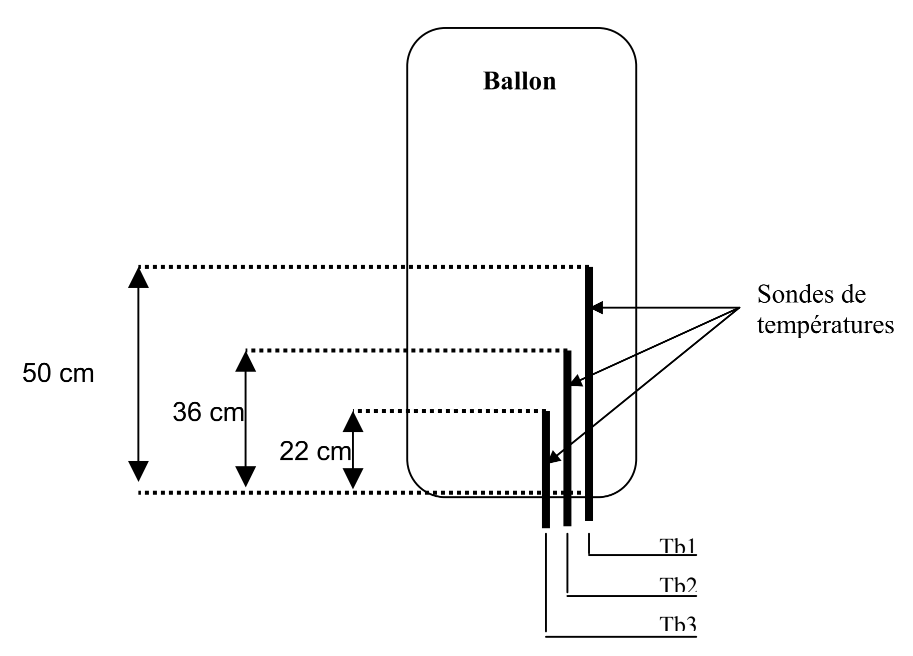


Figure 7-17 : Emplacement des sondes de température au sein du ballon.

7.5.4 La température d'ambiance

Cette sonde est constituée d'un boîtier mural en plastique contenant un élément sensible platine 100 ohms, elle est destinée à la mesure de températures ambiantes en intérieur. Son domaine de température est de -30°C à +100°C [Figure 7-18].



Figure 7-18 : Sonde de température d'ambiance.

Ce boîtier a été placé à l'intérieur du bâtiment au-dessus du capteur solaire noir.

7.5.5 La température extérieure et l'humidité relative

Ce capteur-transmetteur mesure l'humidité relative (HR) et la température [Figure 7-19]. Pour chacun de ces paramètres, il délivre un signal de sortie 4-20 mA.

Les plages de mesure sont les suivantes :

- Humidité relative : 5 à 98% HR ;
- Température : -30 à +130°C.



Figure 7-19 : Sonde de température d'ambiance et d'humidité relative.

7.5.6 Le Débit

Le débitmètre répond à plusieurs exigences assez strictes : tout d'abord il est équipé d'un transmetteur analogique afin de rendre possible l'acquisition de données. Il est compatible avec le fluide caloporteur utilisé dans l'installation solaire et enfin sa section est petite et permet ainsi de mesurer des débits faibles comme ceux de l'expérimentation Le débitmètre choisi permet de répondre à ce cahier des charges [Figure 7-20].



Propriétés	
Diamètre	8 mm
Débit maximum du débitmètre	27,36 l/min
Débit minimum mesurable	2,5 l/min

Figure 7-20 : Photo et caractéristiques du débitmètre Rosemount 8711.

7.5.7 Les Modules d'acquisition

Afin de réaliser l'acquisition sur ordinateur des différentes données en provenance des capteurs de mesures installés, il a fallu installer des modules d'acquisition. Trois modules d'acquisitions de température ont été mis en place (permettant chacun l'acquisition de 6 températures) et un module à 8 entrées analogiques 4-20 mA permettant l'acquisition de la température ambiante, de l'humidité relative et du débit. Par ailleurs, un module à 8 sorties analogiques 0-10V permettant de commander l'électrovanne par la suite fut installé [Figure 7-21]. Ces modules sont équipés de liaison RS 485, ainsi, pour assurer la communication avec l'ordinateur qui possède une liaison RS 232, l'installation d'un convertisseur de port RS 485/RS 232 sur le port série de l'ordinateur a été prévue.

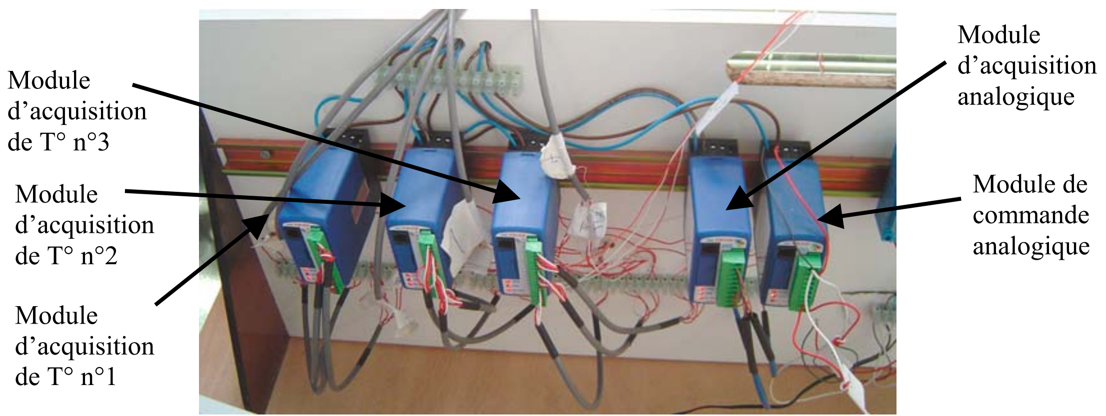


Figure 7-21 : Modules placés sur un rail et connectés aux appareils de mesure et de commande.

7.5.8 L'alimentation

Destinée à l'alimentation des modules d'acquisition et de commande, l'alimentation mise en place est constituée de blocs alimentation pour boucle de courant 4-20mA produisant un courant de sortie maximum de 0,5 A en 24V continu. Pour dimensionner l'installation, les besoins en courant de chaque appareil ont été calculés [Tableau 7-4].

	Intensité nécessaire pour l'alimentation		Nombre d'entrées/sorties utilisé	Sous total	Total
	du module	d'une entrée/sortie			
Module n°1 d'acquisition de T°	0,08 A	0	6	0,080 A	0,570 A
Module n°2 d'acquisition de T°	0,08 A	0	6	0,080 A	
Module n°3 d'acquisition de T°	0,08 A	0	6	0,080 A	
Module n°1 d'acquisition analogique	0,035 A	0,025 A	3	0,110 A	
Module de commande analogique	0,035 A	0,185 A	1	0,220 A	

Tableau 7-4 : Calcul de l'ampérage nécessaire pour le fonctionnement de l'installation.

Pour répondre aux besoins de l'installation deux alimentations de 0,5A ont été nécessaires [Figure 7-22].

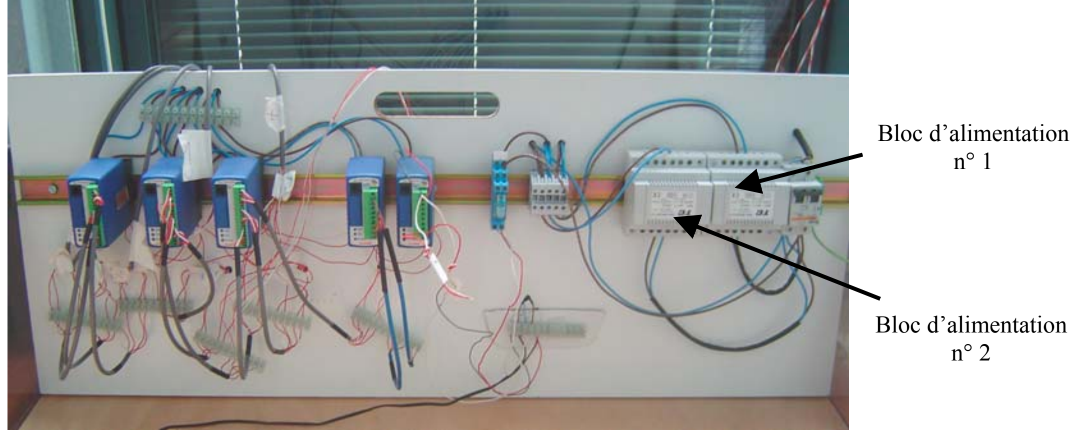


Figure 7-22 : Rail d'expérimentation.

7.5.9 Montage global

Une fois ces modules installés sur le rail d'expérimental, nous avons effectué l'ensemble des branchements et connexions pour assurer l'alimentation et la liaison entre les modules et les sondes de mesure installées auparavant. Ensuite le rail d'acquisition et de commande ainsi que l'ordinateur ont été placés au niveau de la trame 2 de la façade des grands ateliers. La Figure 7-23 illustre le schéma technique de l'ensemble du système d'acquisition mis en place.

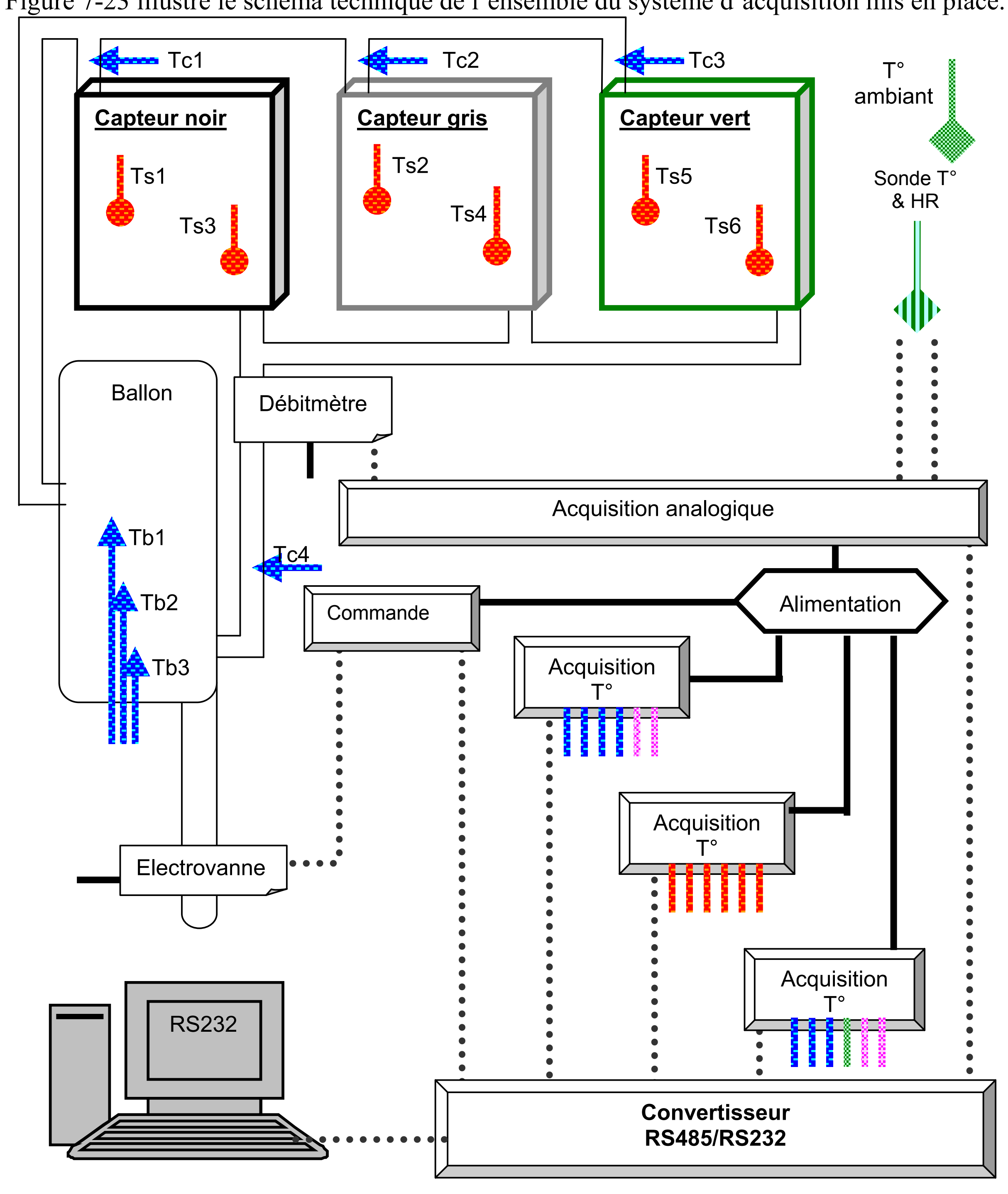


Figure 7-23 : Système d'acquisition en place sur le site de l'Isle d'Abeau.

7.6 Le système d'acquisition

Pour réaliser l'acquisition de données dans cette expérimentation, plusieurs logiciels ont été nécessaires. Tous sont édités par la firme National Instruments, spécialiste de la programmation dans l'acquisition de données et le contrôle d'instruments de mesure. Nous avons d'une part utilisé Industrial Automation OPC Servers, logiciel pour configurer l'ensemble des capteurs expérimentaux installés et d'autre part le logiciel LabVIEW pour réaliser le programme et l'interface pour l'acquisition de données.

7.6.1 Paramétrage de la carte d'acquisition

Comme il l'a été décrit précédemment, l'installation permettant l'acquisition de données est composée de plusieurs modules d'acquisition et d'une carte d'acquisition. Le logiciel « Industrial Automation OPC Servers » a permis le paramétrage de ces modules et ainsi de créer une interface de communication entre les capteurs d'une part et l'ordinateur d'autre part. Le protocole d'échange utilisé pour permettre cette communication est le protocole Modbus.

L'élément central de ce dispositif est le convertisseur de port RS232 / RS485 placé sur le port série de l'ordinateur. Il permet d'assurer la liaison entre les modules (équipés de liaisons RS485) et l'ordinateur (équipé d'une liaison RS232). Pour configurer ce convertisseur en protocole Modbus, une adresse et un nom ont été tout d'abord donnés à chaque module d'acquisition.

7.6.2 Développement d'une interface d'acquisition avec LabVIEW

L'interface développée permet de réaliser plusieurs fonctions essentielles: l'acquisition et l'enregistrement de données d'une part et la commande de l'électrovanne d'autre part.

Pour réaliser ce programme, il fallait utiliser plusieurs instruments virtuels (VI) de la bibliothèque de fonctions du logiciel labVIEW, notamment les VI de la fonction DataSocket, et d'en créer d'autres.

Avant de lancer une expérimentation l'utilisateur doit en premier lieu remplir trois champs :

- la couleur du capteur testé ;
- le lieu où va être enregistré le scénario de puisage ;
- le lieu où vont être enregistrées les données.

L'ensemble des données acquises est réparti en trois groupes distincts [Figure 7-24]. Dans un premier bloc se trouvent six thermomètres permettant de visualiser les deux températures de surface de chacun des trois capteurs. Au-dessus de chaque cadre représentant les capteurs se trouve un indicateur numérique donnant la température de conduit en sortie de capteur. La température Tc4 correspond à la température du fluide caloporteur à l'entrée des capteurs. Le graphique déroulant sert à visualiser ces neuf températures.

Le deuxième cadre permet de connaître en temps réel l'évolution de la température de l'eau au sein du ballon par l'intermédiaire d'un graphe déroulant et de 3 thermomètres. Ce

graphique déroulant permet d'avoir en abscisse le temps absolu et en ordonnée la valeur des températures.

Le dernier bloc permet de visualiser les températures de structure grâce à des indicateurs numériques et un graphe déroulant.

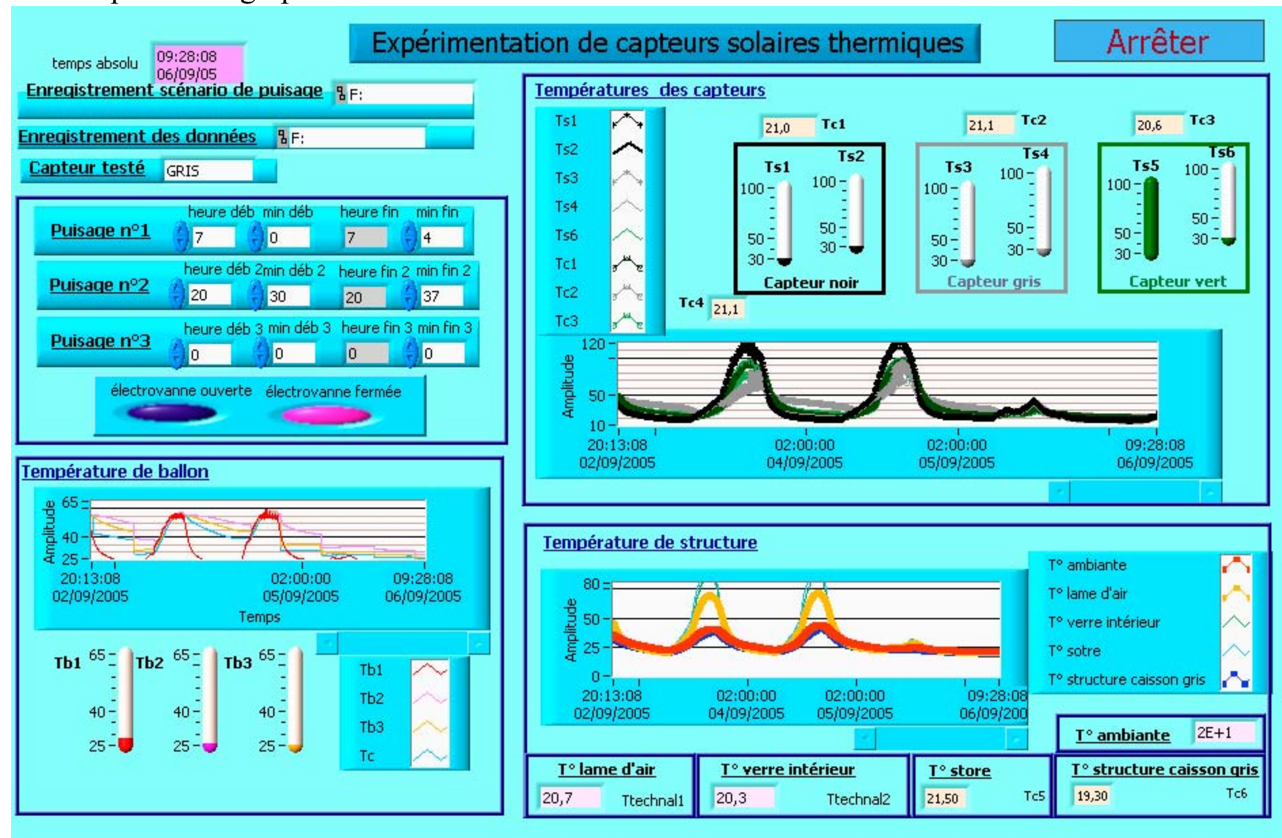


Figure 7-24 : Interface graphique du système d'acquisition de l'installation expérimentale

7.6.3 Données Climatiques

Le complexe des grands ateliers de l'Isle d'Abeau possède sa propre station météorologique, installée en 2004 par le Laboratoire des Sciences de l'Habitat [Figure 7-25].

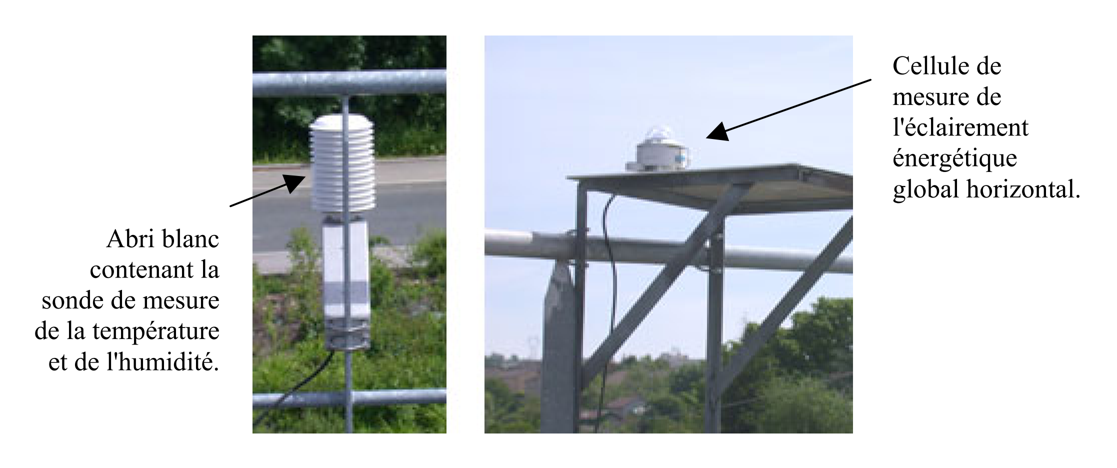


Figure 7-25 : Vue de la station météorologique des GAIA.

Les données de cette station sont accessibles sur le site Internet des GAIA. Les informations disponibles sont les suivantes :

- la hauteur du soleil ;
- l'azimut du soleil (depuis le Nord en allant vers l'Est) ;
- l'éclairement énergétique horizontal global ;
- la température et l'humidité relative de l'air ;
- la vitesse et la direction du vent (depuis le Nord en allant vers l'Est).

Il est possible d'obtenir les données pour chaque jour, le pas d'acquisition des mesures étant de 5 minutes. Ces données sont proposées soit sous forme de graphique soit sous fichier texte (.txt compatible avec Excel).

7.6.4 Le pas de temps de l'acquisition

Les phénomènes liés au bâtiment sont généralement étudiés avec un pas de temps d'une heure. Mais ici un pas de temps aussi grand ne permettrait pas une bonne exploitation des données. En effet la température varie fortement en 24 heures, il faut donc veiller à prendre un pas de temps en accord avec ces variations. L'expérience montre qu'un pas de temps de cinq minutes est tout à fait adapté aux données à acquérir. Ce pas de temps permet de plus une synchronisation avec la station météo des GAIA ayant le même pas de temps.

7.6.5 Le puisage

Pour simuler un fonctionnement réel de capteur solaire, nous avons mis au point un scénario de puisage. Le puisage permet ainsi de feindre une utilisation réelle de l'eau du ballon. Le tableau indicatif ci-dessous a été réalisé par l'ADEME. Il permet de connaître les besoins journaliers d'eau chaude en litres à 60° pour différentes familles selon les points de puisage [Tableau 7-5].

Poste à alimenter	Nombre de personnes vivant au foyer	Besoins journaliers (en litre d'eau chaude sanitaire à 60°)
Evier	1-2	25
	3-4	35
	5-6	45
Lavabo	1-2	30
	3-4	50
	5-6	70
Douche	1-2	50
	3-4	80
	5-6	110
Bain	1-2	120
	3-4	190
	5-6	250

Tableau 7-5 : Besoins journaliers en ECS selon le nombre de personnes vivant au foyer.

De son côté EDF préconise de dimensionner une installation en supposant qu'une personne consomme entre 50 et 60 litres d'eau chaude à 45°C par jour. Quant aux industriels fabricant des installations solaires, ils préconisent d'avoir une consommation d'eau journalière maximale égale au volume du ballon, qui est ici de 150 l. Ces informations provenant de sources diverses ne sont pas toutes concordantes, elles donnent toutefois des indications pour

mettre en place des scénarios de puisage conformes avec la réalité. Nous avons décidé de faire un puisage journalier d'environ 130 l, réalisé en deux fois, l'un le matin et l'autre le soir. Pour mettre au point le scénario de puisage, nous avons utilisé un renseignement essentiel : le débit de puisage lors de l'ouverture de l'électrovanne. Ce dernier est d'environ 13 litres par minute. Une fois le volume d'eau à puiser déterminé, il suffit de faire la conversion pour connaître le temps pendant lequel l'électrovanne doit rester ouverte.
Dans notre scénario sont programmés un premier puisage de 7h00 à 7h05 (soit un volume d'eau extraite d'environ 65 l) et un second puisage de 20h30 à 20h35 (même volume de puisage).

7.7 Validation de l'installation d'acquisition

7.7.1 Installation solaire en stagnation

Les premières données obtenues l'ont été alors que l'installation solaire était en stagnation, c'est à dire que le fluide caloporteur n'était pas en mouvement dans le circuit solaire. L'acquisition des valeurs ci-dessous date du 08/06/05 à 12 :39 :06. Le pas de temps était d'une seconde, ainsi la première ligne correspond à la mesure à 12 :39 :06, la deuxième à 12 :39 :07 et la dernière à 12 :39 :12 [Tableau 7-6].

Ts1	Ts2	Ts3	Ts4	Ts5	Ts6	Tc1	Tc2	Tc3	Tc	Tc5
46,5	42,5	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,5	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,5	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,4	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,4	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,4	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9
46,5	42,4	43,2	40,7	3277	39,4	27,5	31,1	23,2	15,7	32,9

Tc6	Tb1	Tb2	Tb3	Tambiante	Ttechnal1	Ttechnal2	cmde
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,3	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,3	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,3	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,3	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,2	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,2	29	0
3277	20,6	20,3	20,7	16,3	24,2	29	0

Tableau 7-6 : Résultats obtenus avec l'installation solaire en stagnation.

Chaque sonde a été branchée sur la voie prévue avec les particularités suivantes :

- Tc5 correspond à la température de surface du store posé au niveau de la trame 2 ;
- Tc6 n'était relié à aucun capteur, ce qui explique la valeur obtenue (3277), cette valeur est renvoyée lorsque les branchements ne sont pas effectués correctement ou que la sonde est endommagée; dans la suite de l'expérimentation Tc6 sera reliée à une sonde placée sur l'enveloppe structurelle du capteur gris (à l'intérieur du bâtiment).

- Ttechnal1 est la température de surface au niveau du joint de la lame d'air du double vitrage posé au niveau de la trame 2 ;
- Ttechnal2 est la température de surface du verre extérieur du double vitrage posé au niveau de la trame 2.

Ces données sont très intéressantes car elles permettent de vérifier le fonctionnement global des capteurs expérimentaux. Ceci a permis de détecter un problème sur une des 2 sondes de surface du capteur vert (Ts5, sonde située en haut du capteur) : la valeur obtenue est une valeur d'erreur, or après vérification des branchements, nous avons constaté que le problème venait de la sonde elle-même. Ne pouvant pas intervenir sur les capteurs solaires pour la remplacer, cette température sera donc indisponible au cours de l'expérimentation.

7.7.2 Résultats de mesures d'une journée ensoleillée

Les données exploitées dans ce paragraphe ont été obtenues le samedi 11 juin 2005. Cette journée a bénéficié d'un fort éclairement énergétique, les conditions météo pouvaient être qualifiées de bonnes pour le fonctionnement des capteurs solaires [Figure 7-26].

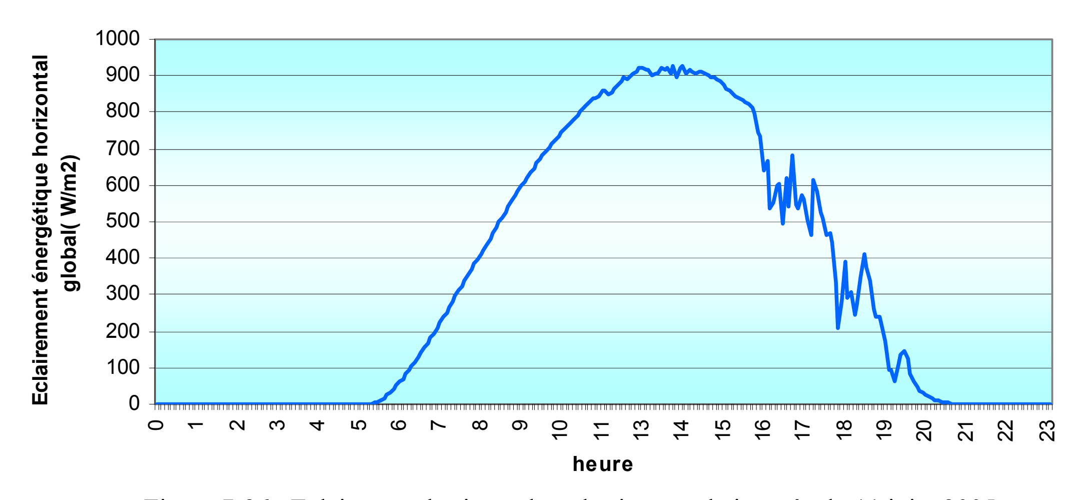


Figure 7-26 : Eclairement horizontal sur le site pour la journée du 11 juin 2005.

La comparaison des températures obtenues grâce aux trois sondes de surface situées en bas de chacun des capteurs (Ts2 pour le capteur noir, Ts4 pour le gris et Ts6 pour le vert) confirme le fait que l'absorbeur noir, de par ses propriétés physiques, s'avère être le plus performant : entre 15h30 et 20h la température de surface du capteur noir est en moyenne de 4,05°C plus élevée que celle du capteur gris, qui elle, est en moyenne de 3,9°C plus élevée que celle du capteur vert. Les différences de température de surface apparaissent donc nettement selon la couleur de l'absorbeur [Figure 7-27].

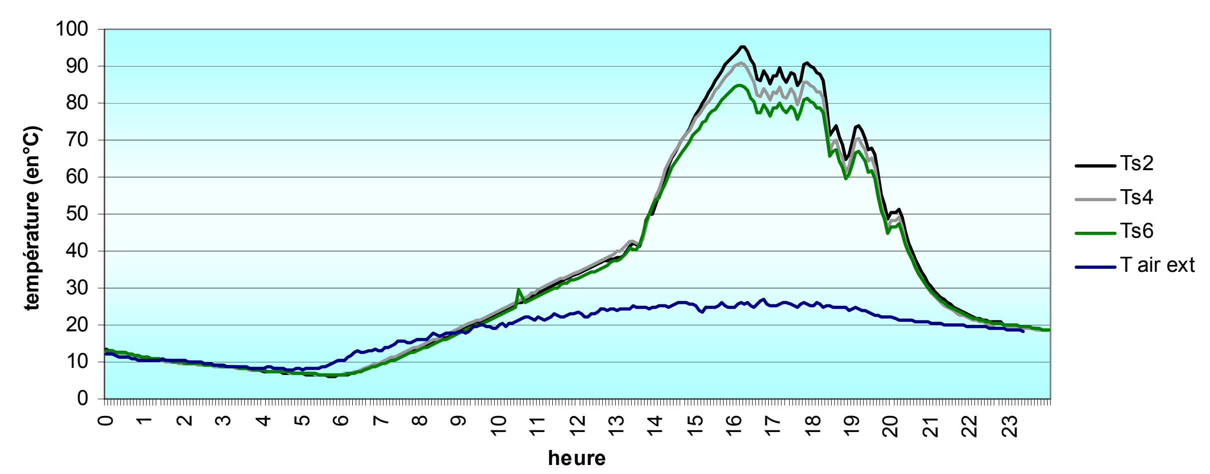


Figure 7-27 : Comparaison des températures de surface en bas des capteurs (11 juin 2005).

La comparaison des températures de conduit nous renseigne aussi sur les propriétés des capteurs. La température de conduit la plus élevée est celle du capteur gris (Tc2). Cette information a priori surprenante, (en effet le capteur noir (Tc1), aux propriétés physiques les plus adaptées, devrait avoir la température de conduit la plus élevée), s'explique par la conception même de l'enveloppe du capteur. Le capteur gris est enfermé dans un caisson, il profite ainsi d'une meilleure isolation par l'arrière et subit moins de pertes thermiques que les deux autres capteurs. Le capteur vert (Tc3) isolé de la même façon que le capteur noir, possède une température de conduit inférieure aux deux autres, ce qui peut naturellement s'expliquer par ses propriétés physiques moins adaptées [Figure 7-28].

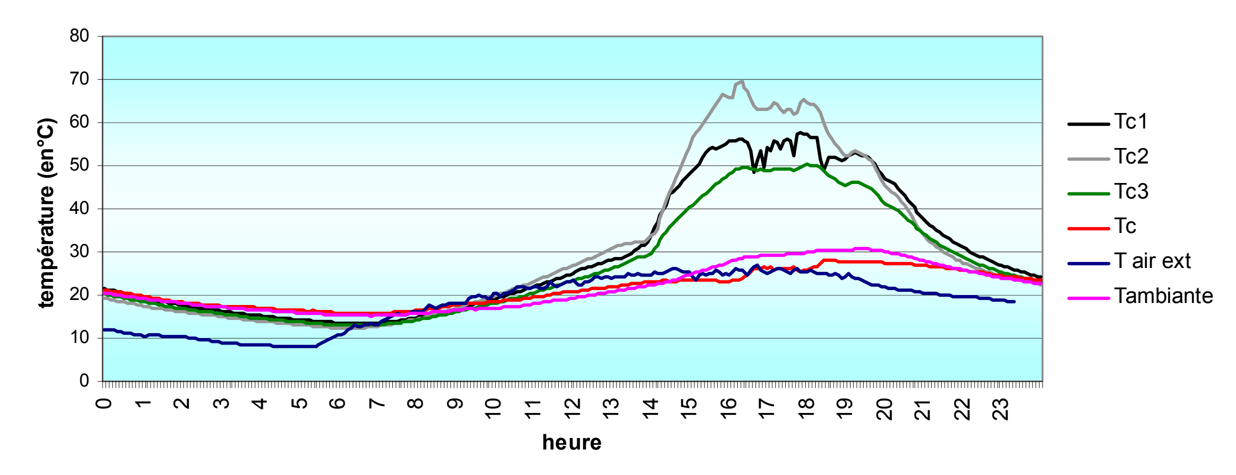


Figure 7-28 : Comparaison des températures de conduit en bas des capteurs (11 juin 2005).

Nous nous sommes aussi intéressés à la différence ΔT° entre la température du fluide caloporteur en sortie de capteur (Tc1, Tc2 ou Tc3 selon le capteur testé) et la température du fluide en sortie de ballon (Tc). La régulation est en effet réglée pour permettre une circulation du fluide lorsque le ΔT° entre ces deux températures est de 5°C. Un ΔT° inférieur à 5°C signifie donc que l'installation solaire est en stagnation et que l'eau chaude sanitaire n'est pas chauffée.

Pour cette journée les résultats semblent plutôt satisfaisants : Avec le capteur vert l'installation a fonctionné durant 8h05 et avec les capteurs gris et noir durant 9h40. Il est à noter que la mise en route du circulateur s'est produit à des horaires différents selon le capteur testé : le capteur gris est le capteur qui permet d'atteindre le plus rapidement un ΔT° supérieur à 5°C mais à l'inverse c'est celui qui, le soir, est retombé le plus rapidement avec un ΔT° inférieur à 5°C [Figure 7-29].

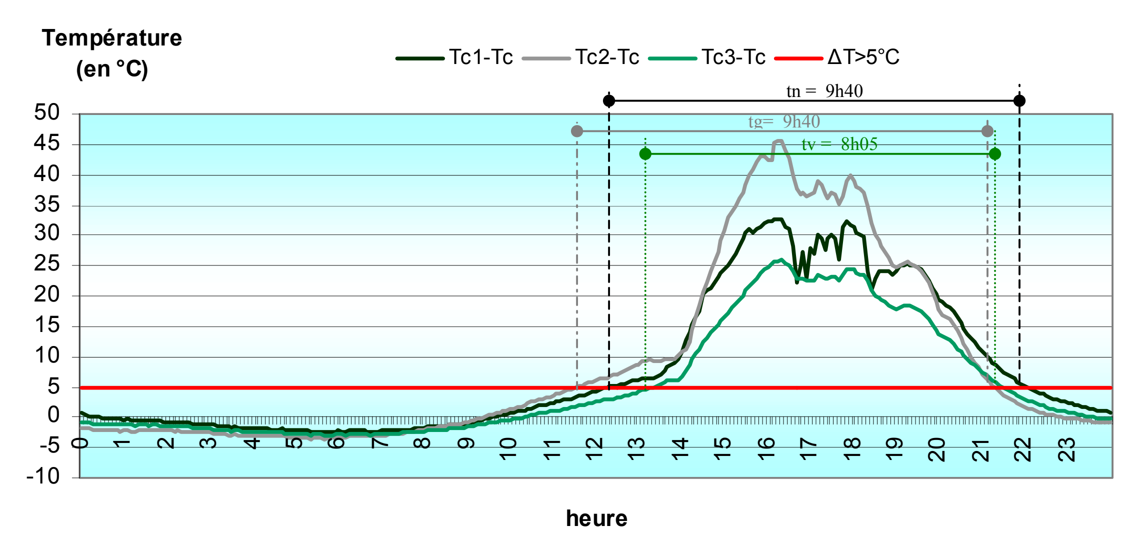


Figure 7-29 : Variation du ΔT° selon les capteurs (11 juin 2005).

7.7.3 Résultats de mesures d'une journée couverte

Les conditions climatiques du 14 juin 2005 étaient plus dégradées que celles du 11 juin. L'éclairement a en effet été beaucoup plus faible [Figure 7-30].

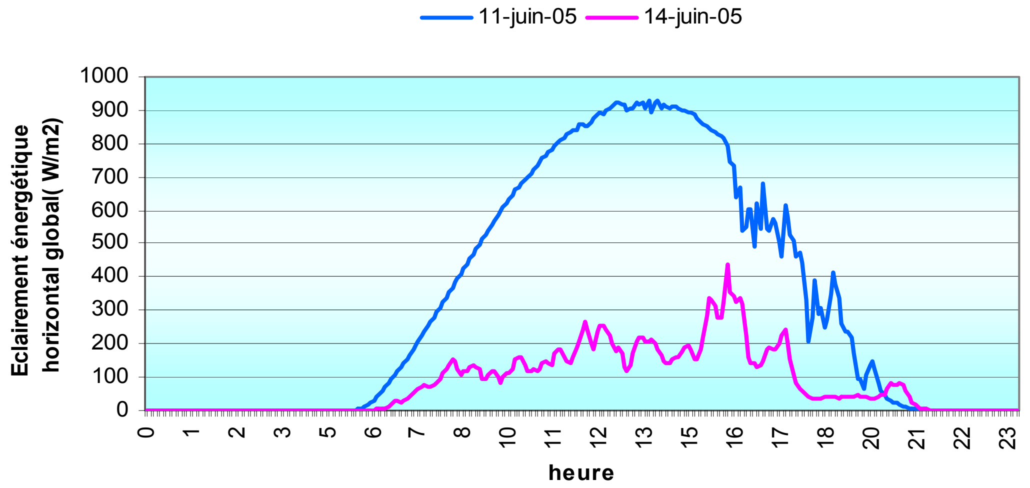


Figure 7-30 : Comparaison de l'éclairement horizontal pour les journées du 11 et du 14 juin.

Les résultats obtenus pour les températures de surface des capteurs montrent clairement les conséquences de ce faible ensoleillement : les maxima atteints ne dépassent pas 40°C alors que pour la journée du 11 juin la température en surface du capteur noir est montée à plus de 90°C [Figure 7-31]. Ce graphique révèle par ailleurs un problème technique survenu sur la sonde de température Ts6 : seulement une partie des données y est représentée (jusqu'à

14H45) car ensuite la valeur indiquée était 3277 (code erreur). En fait ce problème était dû au débranchement d'un des câbles de la sonde.

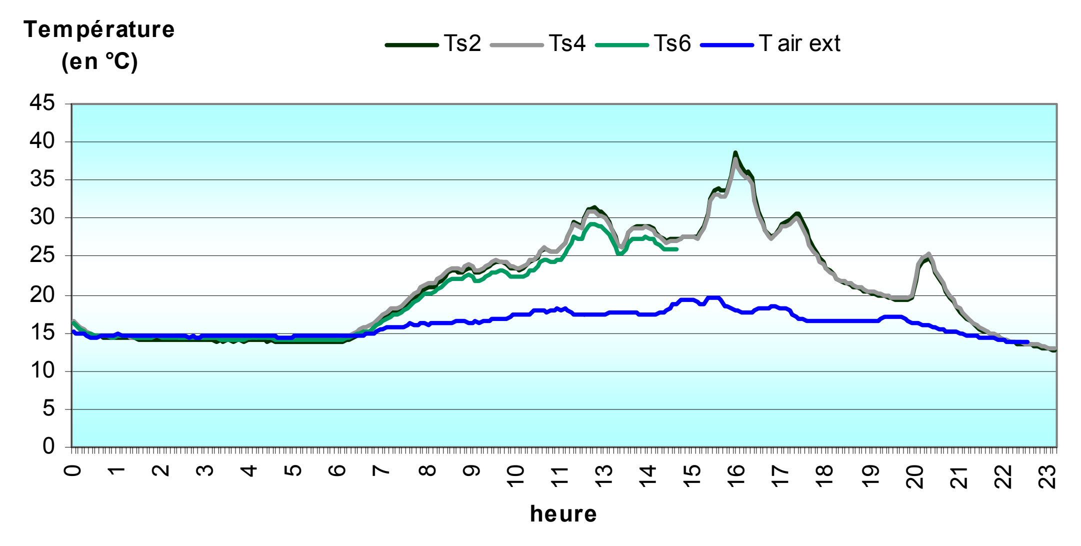


Figure 7-31 : Variation des températures de surface des capteurs (14 juin 2005).

L'analyse de la Figure 7-32 montre que la condition ΔT°>5°C (condition nécessaire pour que le fluide caloporteur se mette en mouvement) n'est pas atteinte par le capteur vert et même si les deux autres capteurs remplissent cette condition, c'est le cas seulement pendant 0H50 pour le capteur noir et 1H10 pour le capteur gris.

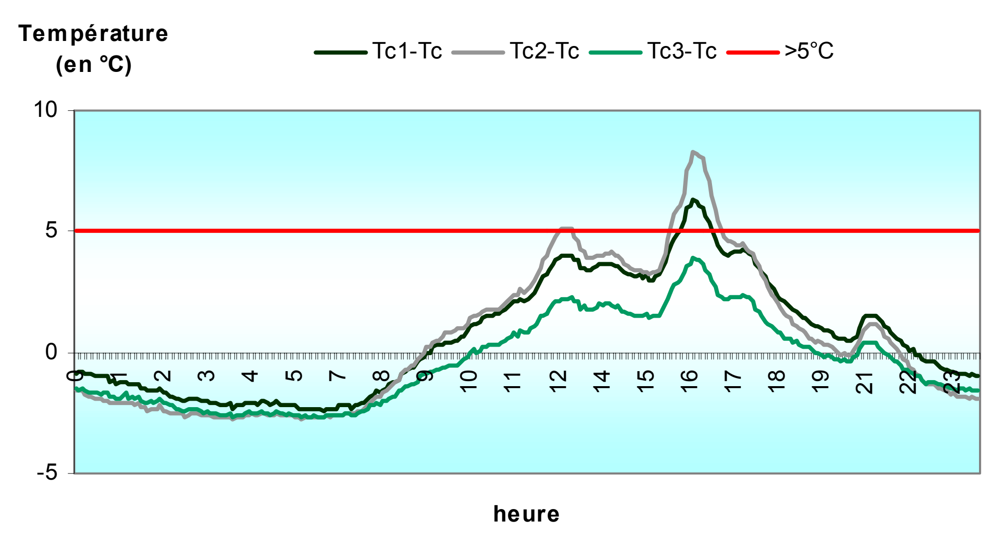


Figure 7-32 : Variation du ΔT° selon les capteurs (14 juin 2005).

7.8 Mise en route de l'installation et exploitation des résultats

Chaque capteur a été testé plusieurs jours consécutifs. Le tableau suivant permet de connaître l'ensemble des semaines de tests ainsi que les capteurs testés [Tableau 7-7]. L'exploitation des résultats s'articule en deux grands axes: Dans un premier temps sont analysés les résultats des capteurs afin de qualifier les performances de l'installation dans son ensemble. Dans un second temps sont comparés les capteurs entre eux afin de déterminer si les performances variaient beaucoup d'un capteur à l'autre.

Période de test		**Capteur testé**
Période 1	12 au 18 juillet 2005	NOIR
Période 2	19 au 24 juillet 2005	GRIS
Période 3	27 juillet au 2 août 2005	VERT

Tableau 7-7 : Ensemble des expérimentations réalisées.

Nous avons tracé plusieurs graphiques pour chaque semaine de test :

- Graphique n°1 : il donne le rayonnement horizontal global (en W/m2) ;
- Graphique n°2 : il donne les 3 températures de surface Ts2, Ts4 et Ts6 ainsi que la température extérieure en fonction du temps ;
- Graphique n°3 : il donne les 4 températures de conduit : Tc1, Tc2, Tc3 et Tc4 ;
- Graphique n°4 : il donne les 3 températures de ballon : Tb1, Tb2 et Tb3 ;
- Graphique n°5 : il donne les températures de structure des éléments ainsi que la température extérieure.

Dans la suite, certains de ces graphiques seront utilisés pour illustrer les différentes analyses réalisées.

7.8.1 Températures de surface

L'analyse des graphiques représentant les températures de surface montre que le capteur qui est testé possède une température de surface nettement moins élevée que les deux autres capteurs, qui sont eux en stagnation. Le graphique suivant permet de connaître les moyennes des maxima sur chaque période de test des températures de surfaces Ts2, Ts4 et Ts6 [Figure 7-33].

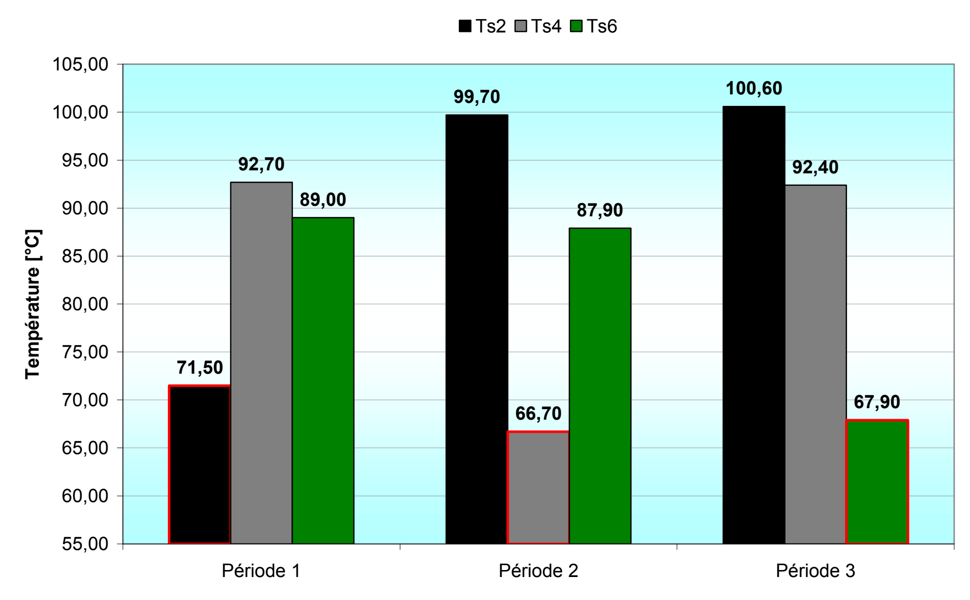


Figure 7-33 : Moyenne des maxima de chacune des températures de surface.

En stagnation les températures de surface atteignent près de 101°C pour le capteur noir, 93°C pour le gris et 89°C pour le vert. En fonctionnement ces maxima diminuent de plus de 20°C : le capteur noir monte au maximum à 71,5°C, les capteurs gris et vert atteignent des maxima inférieurs et proches l'un de l'autre (66,7°C pour le premier et 67,9°C pour le second).

7.8.2 Températures de conduit

Pour chaque période de test, le capteur dont la température de conduit est la plus faible est celui qui est en fonctionnement [Figure 7-34].

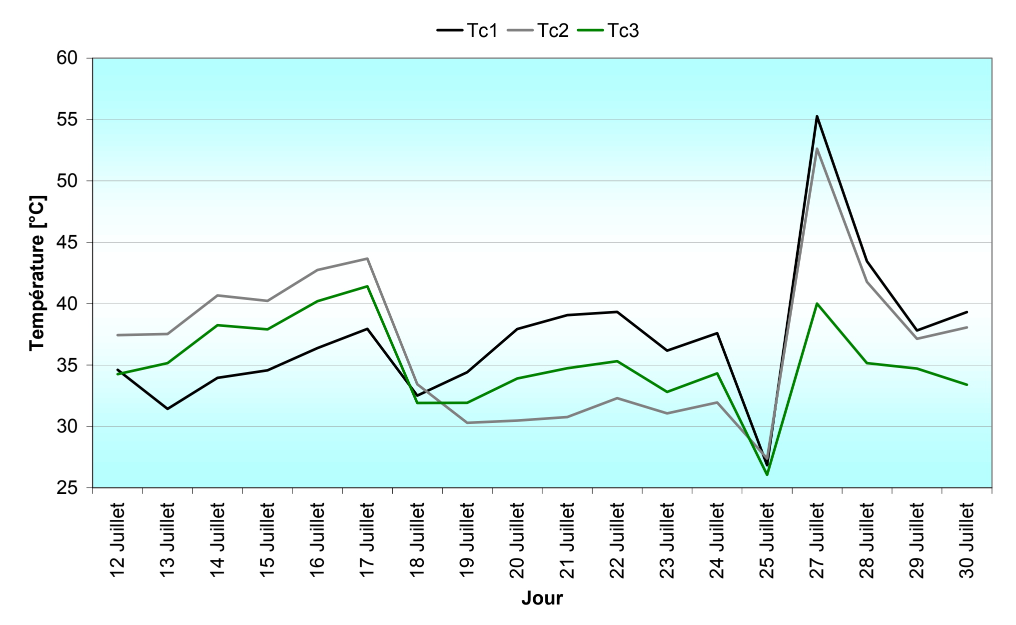


Figure 7-34 : Moyenne journalière des températures de conduit.

Le graphique suivant permet de confirmer que l'isolation du capteur gris est meilleure. La température de conduit moyenne du capteur gris en stagnation atteint 38,92 °C sur la troisième période de test, il n'a que 1,41 °C d'écart avec le capteur noir, lui aussi en stagnation [Figure 7-35].

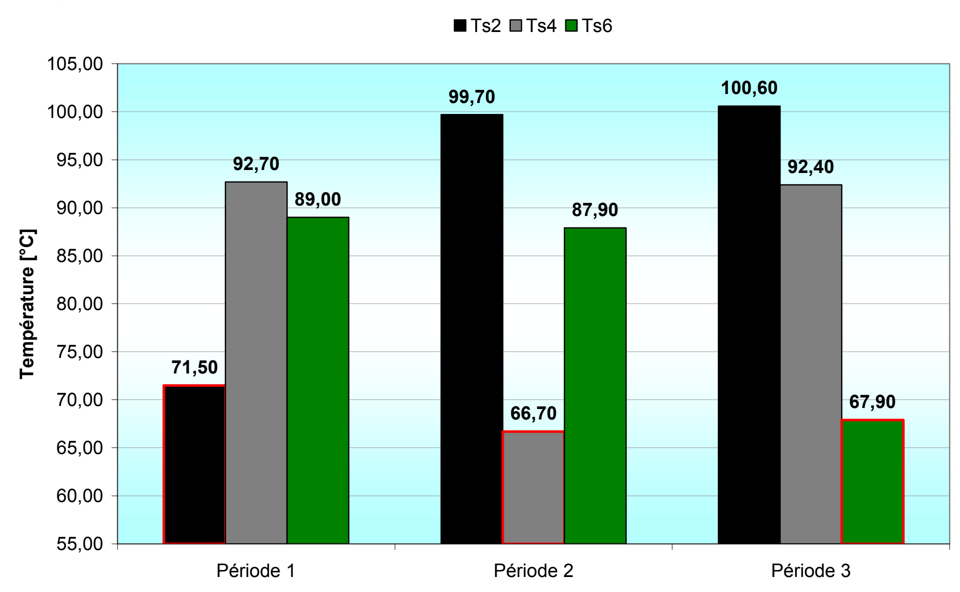


Figure 7-35 : Moyenne des températures de conduit sur chaque période.

Ainsi les défauts du capteur gris au niveau de ses coefficients d'absorption et d'émission sont quasiment compensés par le fait que son enveloppe structurelle est mieux isolée.

Quant au capteur vert il est à noter que sa température de conduit moyenne en fonctionnement (période 3) est très proche de sa température de conduit moyenne en stagnation qui est de 35,2°C alors que pour les deux autres capteurs les températures moyennes de conduit en stagnation sont largement supérieures aux températures moyennes en fonctionnement [Tableau 7-8]. Ceci est dû au fait que le capteur vert possède la configuration la moins favorable.

	Température de conduit moyenne (en °C)	
	Capteur en fonctionnement	Capteur en stagnation
NOIR	33,5	40,55
GRIS	31,6	39,85
VERT	35,4	35,2

Tableau 7-8 : Valeurs moyennes des températures de conduit des différents capteurs.

7.8.3 Températures de structure

La température de structure est une donnée essentielle pour les industriels, ainsi que dans le cadre de la réglementation thermique. Les maximums atteints chaque jour par les températures de structure sont donnés par le graphique suivant [Figure 7-36]. Ces données sont très intéressantes pour la stabilité de la structure et la sécurité des usagers. Les capteurs solaires étant des prototypes, les températures que pouvaient atteindre les différents éléments de la structure étaient une donnée inconnue.

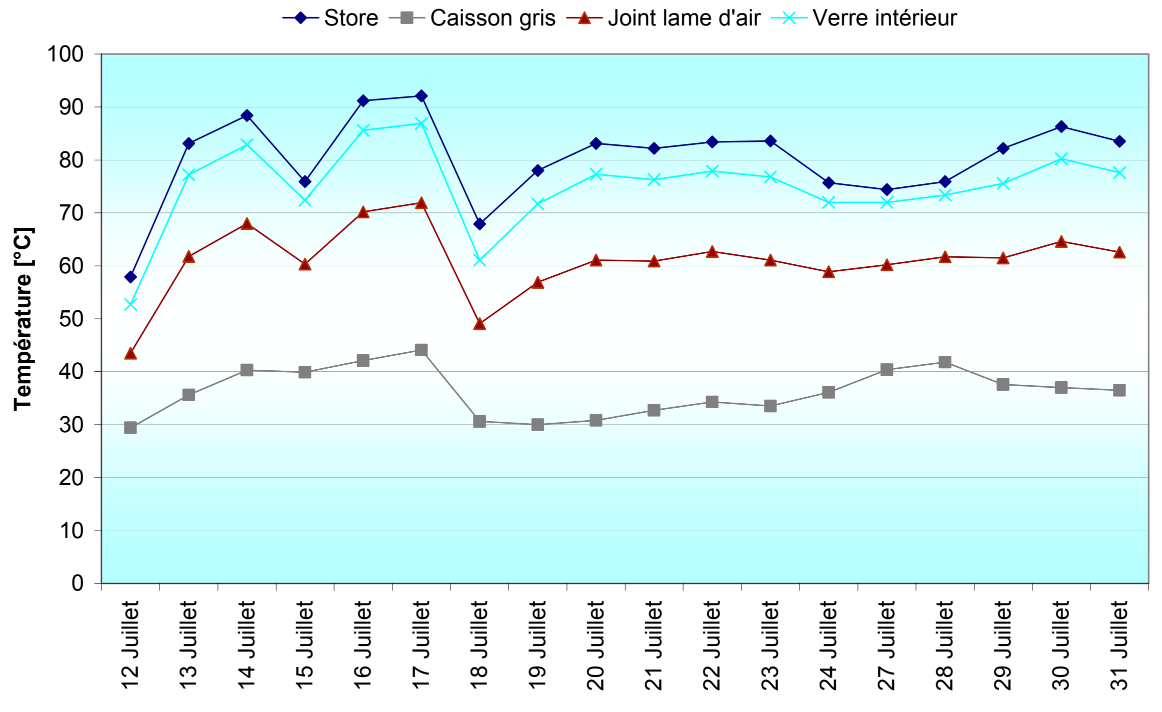


Figure 7-36 : Maximum atteint chaque jour par les différentes températures de structure.

En effet, ces résultats montrent que la température maximale du joint au niveau de la lame d'air ne dépasse pas 70°C, celle du store intérieur 95°C et celle du verre extérieur du double

vitrage 87°C. Pour les joints, la plage d'utilisation est en général comprise entre –20°C et +70°C : les mesures effectuées au niveau du joint de la lame d'air permettent de penser qu'il n'y aura pas d'usure anormale des joints.

Quant à la température maximale atteinte au niveau du caisson gris elle ne dépasse pas 45°C en période de stagnation, sachant que la température intérieure pendant cette même période était du même ordre. En effet, l'évolution de cette température pendant la période d'essai et les évolutions des températures d'ambiance intérieure et extérieure montrent que la température au niveau du caisson gris est très dépendante de la température intérieure dans le cas de notre installation [Figure 7-37]. Donc cette température qui paraît élevée n'est en effet que la conséquence d'une température ambiante intérieure trop élevée. Ceci conduit à conclure que pour un cas plus réel où la température intérieure ne doit pas dépasser les 30°C cette température ne sera pas plus élevée.

Figure 7-37 : Evolution de la température de surface du caisson gris avec les températures ambiantes.

Cette analyse est importante quant à la faisabilité d'un produit qui ne devrait pas créer des risques (de brûlures) pour un usager occupant l'intérieur du bâtiment et qui pourra éventuellement avoir accès à la face arrière du composant solaire. En plus, elle peut servir à déterminer l'impact de l'intégration sur le climat intérieur de la zone derrière le capteur.

7.8.4 Température de ballon

L'analyse des graphiques concernant les températures de ballon met en exergue plusieurs phénomènes. Tout d'abord lorsque les conditions climatiques sont correctes (comme les 15, 16 et 17 juillet 2005), le maximum atteint en fin de journée par la sonde Tb1 augmente chaque jour. Il est en effet de 49,2°C le 15, de 52,6°C le 16 et de 55,4°C le 17.

Par contre les mauvaises conditions climatiques du 18 ne permettent d'atteindre que 46,7°C en fin de journée [Figure 7-38]. Ce phénomène est tout naturellement dû au fait que l'eau

réchauffée pendant une journée n'est pas entièrement vidée lors du puisage et influe donc sur le jour suivant.

Figure 7-38 : Températures mesurées de l'eau dans le ballon du 15 au 18 juillet 2005.

Les moments où sont effectués les puisages sont aussi très repérables sur le graphique. C'est la courbe de température Tb3 qui subit le plus ces chutes de températures dues aux puisages journaliers et ce parce que la sonde correspondante est située le plus bas au sein du ballon.

Par ailleurs, l'écart moyen entre les 3 températures de ballon est donné dans le tableau suivant [Tableau 7-9].

Différence de température	Tb1-Tb2	Tb1-Tb3	Tb2-Tb3
Écart moyen sur la période du 12 juillet au 2 août 2005	2,6	5,4	2,8

Tableau 7-9 : Différence moyenne entre les 3 différentes températures de ballon.

Ces écarts sont des moyennes sur la période du 12 juillet au 2 août 2005. Ils cachent de très grandes disparités. Lorsque les puisages ont lieu, les écarts entre les 3 températures de ballon sont très importants, ils peuvent atteindre plus de 10°C entre Tb1 et Tb3. À titre d'exemple le 22 juillet à 20h55 la différence entre Tb1 et Tb3 est de 13,6°C. Inversement les après-midis (c'est-à-dire quand la température de l'eau dans le ballon augmente) les 3 températures sont proches les unes des autres, les écarts sont inférieurs à 1,5°C.

Il est enfin important de connaître la température de l'eau dans le ballon quelques minutes avant chacun des 2 puisages journaliers pour savoir si la température atteinte est suffisante pour une utilisation de type eau chaude sanitaire [Figure 7-39].

La température de l'eau dans le ballon est dans 81% des cas plus élevée lors du puisage de soir. Cela s'explique naturellement du fait que l'eau puisée le soir a pu être réchauffée toute la journée contrairement à celle du matin. En moyenne la température est par ailleurs de 42,5°C lors du puisage du matin et de 46,5°C lors du puisage du soir. Les températures atteintes le

soir répondent ainsi dans 71% des cas aux recommandations EDF, c'est à dire obtenir une eau à 45°C. Le matin la température atteint par contre les 45°C dans seulement 24% des cas. Toutefois si l'eau du ballon était réellement utilisée elle serait puisée par le haut du ballon c'est à dire un mètre plus haut que là où est mesurée la température de l'eau dans le ballon Tb1. La température serait donc plus élevée de plusieurs degrés et atteindrait les recommandations.

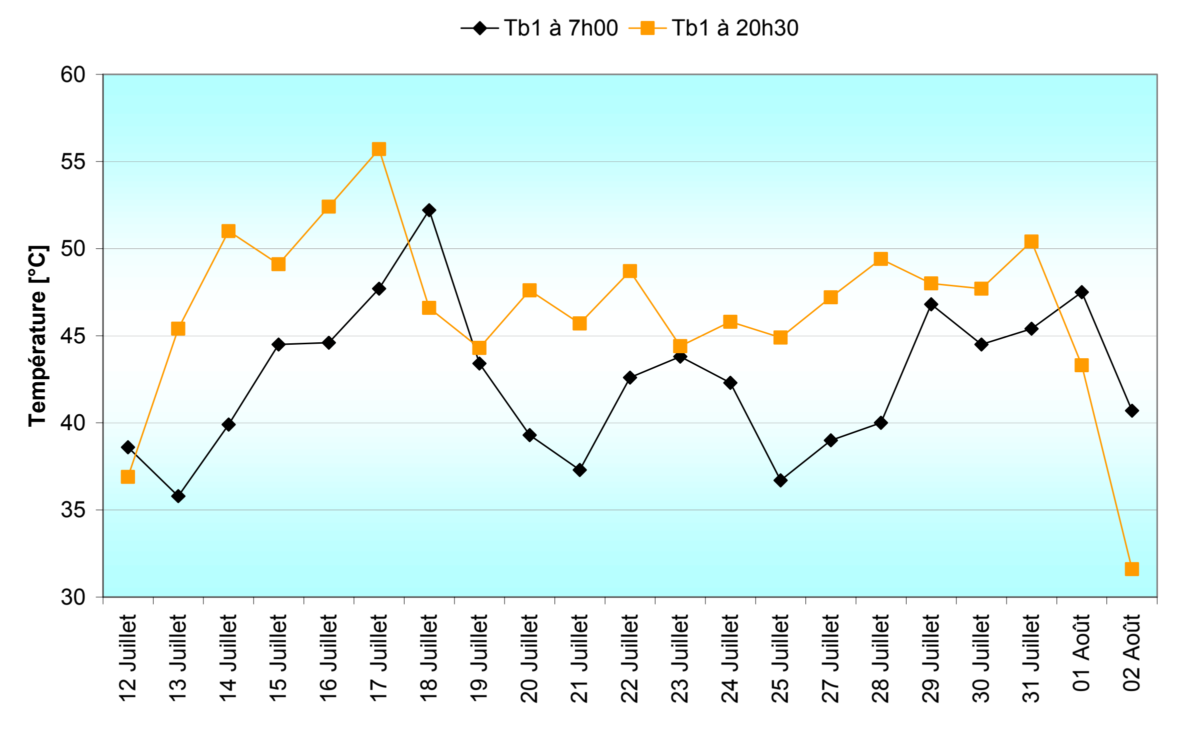


Figure 7-39 : Température de l'eau dans le ballon Tb1 avant chacun des 2 puisages journaliers.

7.9 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

La confrontation des résultats de la modélisation avec les mesures expérimentales constitue une étape essentielle dans le processus d'évaluation du modèle développé. L'objectif de la confrontation que nous présentons dans la suite consiste à évaluer la capacité du modèle développé sous MATLAB et intégré dans TRNSYS à décrire le comportement thermique en régime dynamique des modules solaires prototypes intégrés dans la façade.

Puisque le système solaire expérimental installé aux GAIA permet de tester un seul module solaire en fonctionnement à la fois, nous avons alors décidé de mener une analyse sur trois périodes différentes dont chacune permet d'étudier un module en marche et d'observer le comportement de deux autres modules en stagnation.

Les données climatiques utilisées sont récupérées à partir des mesures directes obtenues par les sondes placées à côté de l'installation et à partir des fichiers enregistrés en temps réel par la station météorologique installée par le LASH sur le site des Grands Ateliers.

Lorsqu'il s'agit du module en fonctionnement, la productivité du système solaire nous paraît comme étant l'élément essentiel à observer. Nous étudions ainsi le rendement du capteur intégré en observant le niveau de température de l'eau dans le ballon de stockage.

Dans le cas des capteurs en stagnation, nous nous intéressons à la température moyenne de la plaque absorbante du capteur, qui est un élément important dans l'étude de l'impact sur l'intégration des capteurs sur l'ambiance intérieure de la zone intérieure du bâtiment.

7.9.1 Réglage des paramètres de simulation

Afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux et numériques il est indispensable de s'assurer du bon paramétrage du modèle numérique. Trois facteurs principaux du modèle numérique sont étudiés et analysés :

- Le pas de temps ;
- Le scénario de puisage ;
- Les pertes dues au ballon ;

Les tests sont réalisés sur trois périodes correspondant au système solaire ayant à chaque fois un module solaire prototype comme élément capteur.

7.9.1.1 Le pas de temps

Le pas de temps habituellement utilisé sous TRNSYS pour réaliser les simulations est d'une heure. Toutefois le pas de temps du fichier météo enregistré sur place étant de 5 minutes, nous avons réalisé des tests afin de définir le pas de temps le plus approprié à notre expérimentation. Quatre pas de temps sont testés : 5 min, 15 min, 30 min et 1 heure.

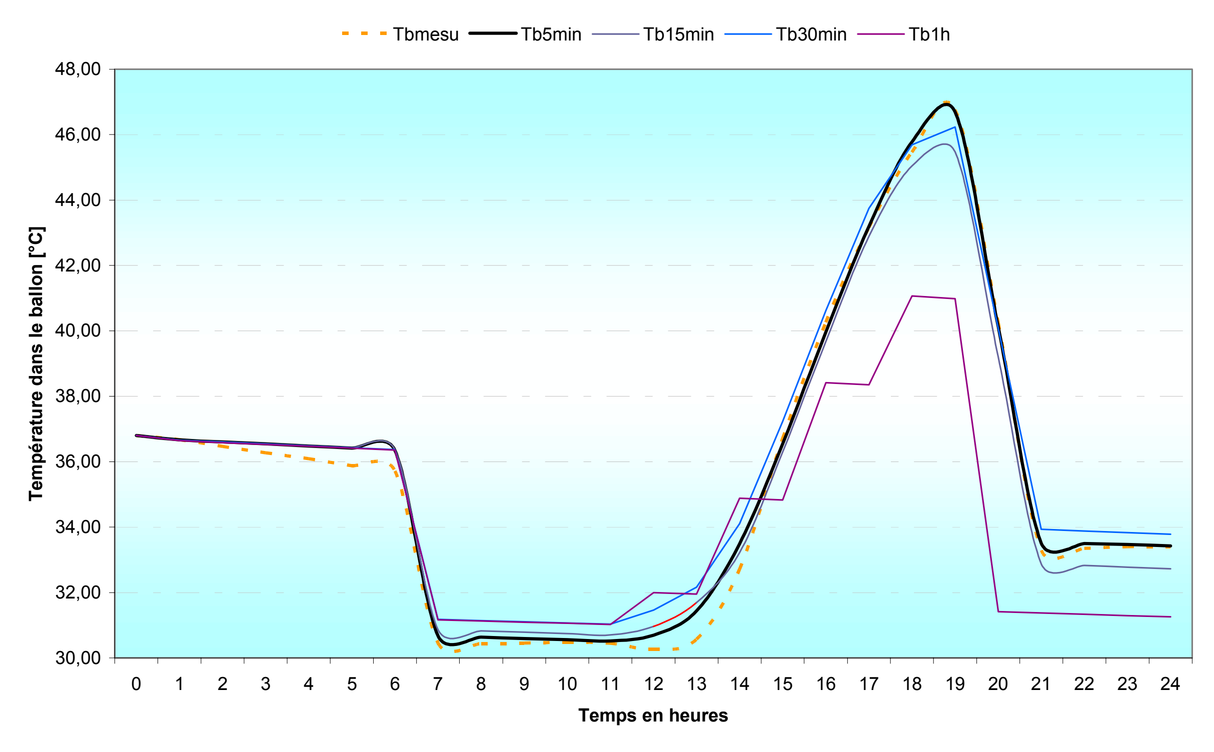


Figure 7-40 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon suivant le pas de temps de simulation (en 20 juillet 2005).

La Figure 7-40 représente la température d'eau dans le ballon pour le capteur gris dans la journée du 20 juillet 2005 pour chacun des quatre pas de temps étudiés en comparaison avec la température moyenne mesurée expérimentalement.

Le graphique démontre que le profil de température le plus proche des résultats expérimentaux correspond au pas de temps de 5 minutes. L'écart de la moyenne de la température du ballon sur la journée peut s'élever à 1°C avec un pas de temps de 1 heure par rapport aux valeurs expérimentales. Avec un pas de temps de 5 minutes, l'écart sur la journée entre la moyenne de la température du ballon et la température moyenne expérimentale ne dépasse pas 0,2°C. Le pas de temps le plus adapté se révèle être le pas de temps de 5 minutes. Simulation et expérimentation ont par ailleurs ainsi le même pas de temps.

7.9.1.2 Le scénario du puisage

Afin de réaliser un puisage sous simulation numérique correspondant le plus possible au puisage réalisé expérimentalement en deux puisages à des horaires similaires, quatre profils d'utilisations sont mis en place. La principale caractéristique de ces profils est de maintenir une quantité d'eau puisée au niveau du ballon sur une journée égale à celle puisée expérimentalement. C'est en fait la durée du puisage qui change, et donc le débit. Dans le premier profil chacun des deux puisages dure 2 heures, dans le deuxième 1 heure, dans le troisième 30 minutes et dans le quatrième 5 minutes [Tableau 7-10].

		Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil exp.
Puisage n°1	Heure début	5h	5h30	5h45	6h00	6h
	Heure fin	7h	6h30	6h15	6h05	6H05
	Durée	2h	1h	30 min	5 min	5 min
Puisage n°2	Heure début	18h30	19h	19h15	19h30	19h30
	Heure fin	20h30	20h	19h45	19h35	19h35
	Durée	2h	1h	30 min	5 min	5 min

Tableau 7-10 : Horaires de puisage pour les quatre profils testés.

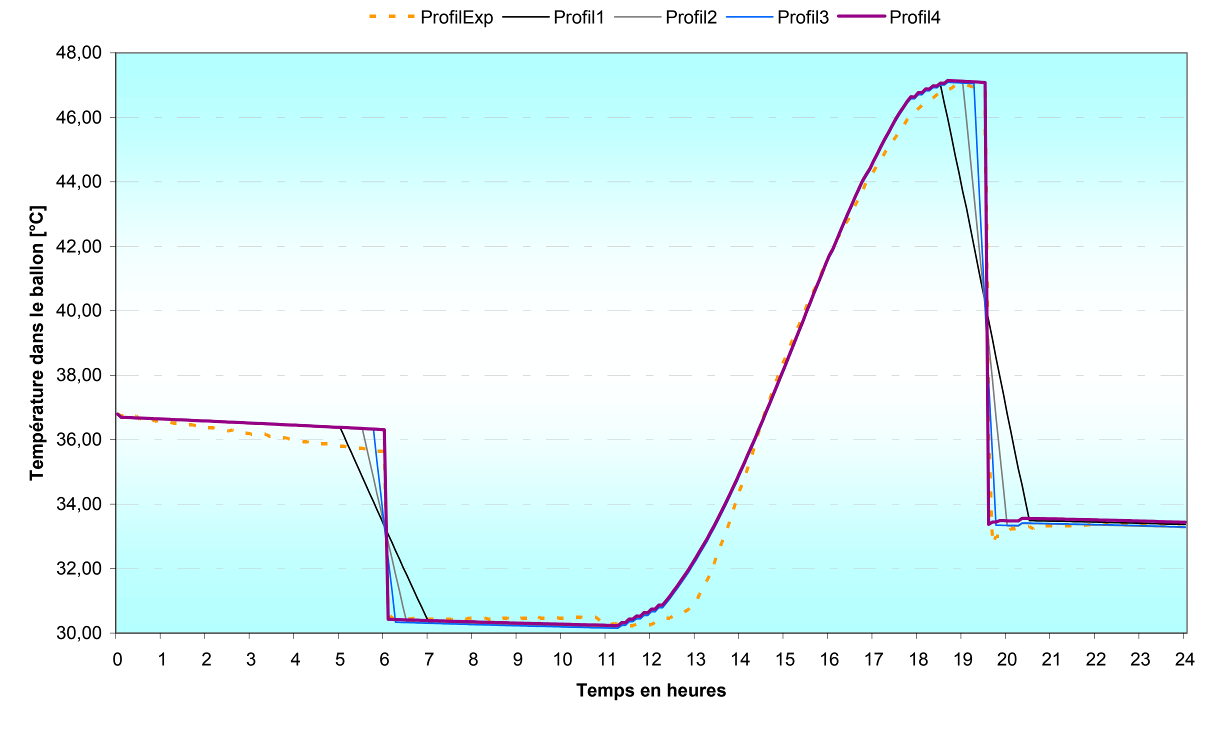


Figure 7-41 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon suivant le profil de puisage (en 20 juillet 2005).

Les quatre courbes de température dans le ballon, obtenues à partir de ces profils numériques, donnent des niveaux proches. La différence se situe au niveau des puisages : plus la durée du puisage est courte, plus la pente de la courbe de température est forte.
Le profil 4 est celui qui ressemble fortement au profil expérimental [Figure 7-41]. Il est ainsi utilisé dans la suite pour les simulations de comparaisons.

7.9.1.3 Les pertes dues au ballon

Plusieurs paramètres peuvent naturellement être modifiés dans ce composant physique. Le volume du ballon est un paramètre fixe égal à 150 l et la chaleur spécifique de l'eau dans le ballon est de 4,19 kJ/kg.K. Le paramètre traduisant les pertes énergétiques est le coefficient de perte du ballon. Afin de déterminer la valeur du coefficient de perte qui correspond le plus au ballon utilisé dans l'expérimentation, nous avons choisi de mener des simulations en considérant les quatre valeurs suivantes : 1, 3, 5 et 7 kJ/h.m².K. Les résultats obtenus par des simulations menées avec ces valeurs pour la journée du 20 juillet 2005 sont présentés dans la figure suivante :

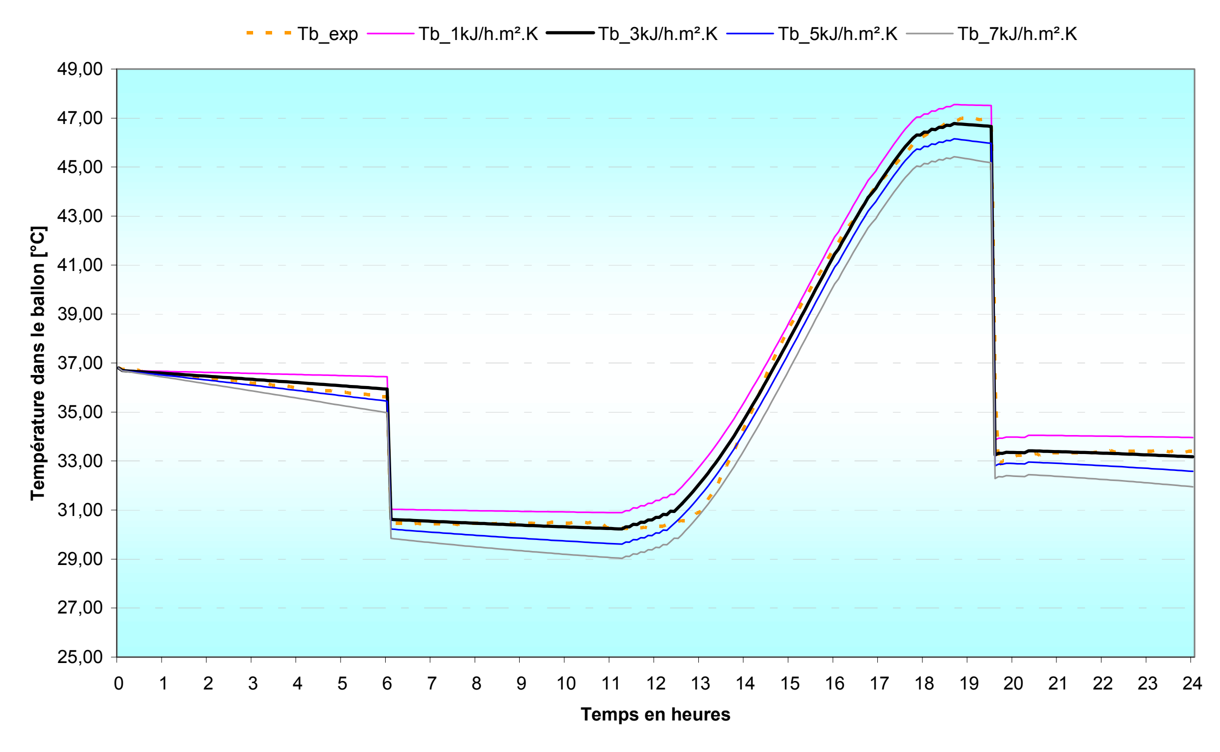


Figure 7-42 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon suivant le coefficient de perte du ballon (en 20 juillet 2005).

Les résultats obtenus avec un coefficient de perte égal à 3 kJ/h.m².K s'approchent fortement des données obtenues expérimentalement [Figure 7-42]. Il semble par ailleurs qu'améliorer ce coefficient, en diminuant sa valeur, ne permette pas d'augmenter les performances de façon significative. En effet, passer de 7 à 3 kJ/h.m².K permet de gagner 1,53 °C sur la moyenne de la température du ballon dans la journée.

7.9.2 Résultats et discussion

La configuration du modèle numérique utilisée pour faire l'étude comparative est donnée par le tableau suivant [Tableau 7-11]. Les simulations sont effectuées sur six journées bien ensoleillées correspondant à des périodes d'expérimentation de chacun des capteurs prototypes.

Capteur en fonctionnement		Noir	Gris	Vert
Période de simulation	Début	13/07 à 0h	20/07 à 0h	04/08 à 0h
	Fin	14/07 à 24h	21/07 à 24h	05/08 à 24h
Configuration du capteur	Emissivité de l'absorbeur	0,077	0,86	0,95
	Absorptivité de l'absorbeur	0,956	0,95	0,94
Configuration du ballon	Coefficient de perte du ballon	3 kJ/h.m².K		
Scénario de puisage	Puisage N°1	de 6h00 à 6h05		
	Puisage N°2	de 19h30 à 19h35		

Tableau 7-11 : Paramétrage utilisé dans la simulation numérique des trois capteurs prototypes.

Lorsque le capteur testé est lié au système solaire, nous nous intéressons à sa productivité. La température de l'eau dans le ballon de stockage est alors observée. Les deux autres capteurs sont alors en stagnation, et nous observons ainsi la température moyenne de la plaque absorbante qui permettra de déterminer l'impact sur l'ambiance intérieure du bâtiment.

Dans la suite, les comparaisons entre les valeurs simulées et les données expérimentales de chaque capteur sont effectuées sur les trois périodes choisies et les résultats sont présentés sous la forme de trois graphiques pour chaque période. Sur le premier sont tracées les courbes représentant les températures de l'eau dans le ballon du stockage lié au capteur en fonctionnement qui assure la productivité en chaleur: la moyenne des trois températures expérimentales (Tb1, Tb2 et Tb3) ainsi que la température moyenne à mi-hauteur du ballon, obtenue par simulation numérique. Sur les deux autres graphiques sont tracées les températures moyennes des absorbeurs des deux autres capteurs en stagnation.

7.9.2.1 Le capteur noir en production d'eau chaude

Les résultats des simulations sont confrontés avec les mesures expérimentales afin de tester la capacité du modèle numérique à prédire le comportement thermique et la productivité énergétique du capteur solaire intégré dans la façade. Les résultats obtenus lorsque le capteur noir est un composant du système solaire sont traduits par la température de l'eau dans le ballon de stockage [Figure 7-43].

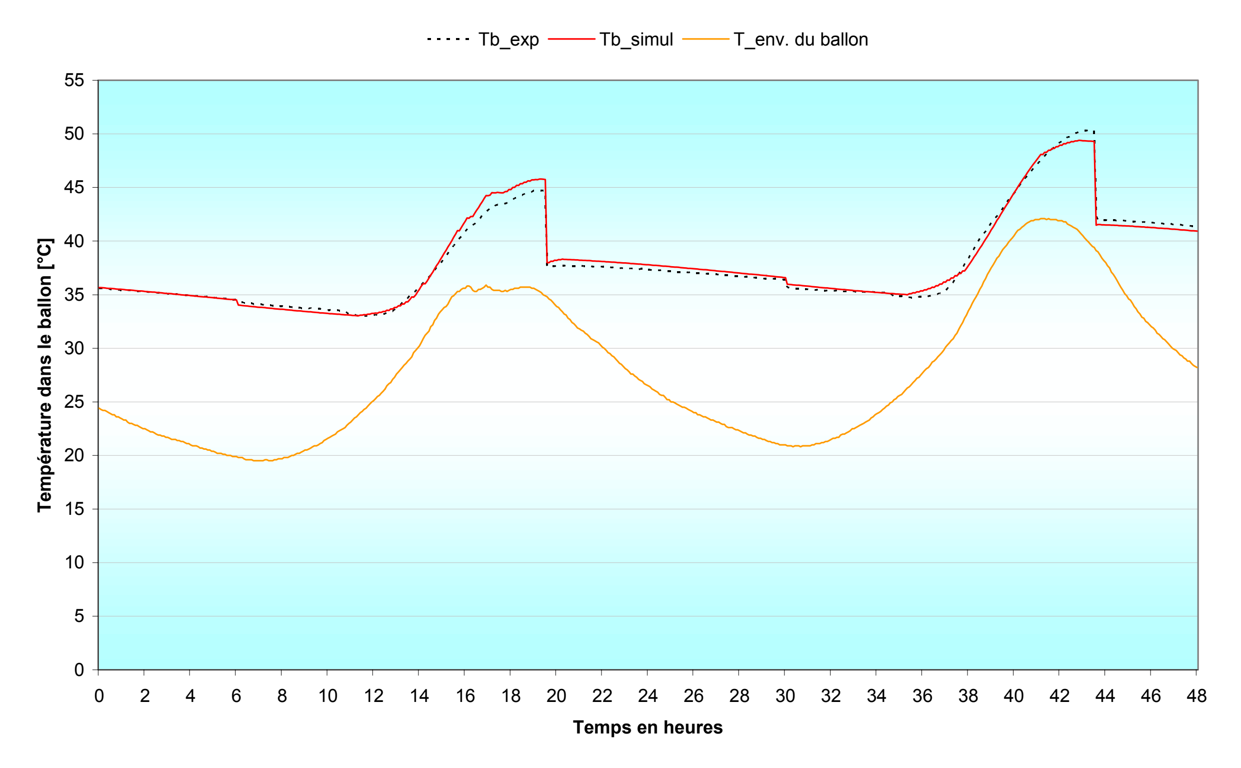


Figure 7-43 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon du stockage (13-14 juillet 2005).

La température d'eau simulée suit bien la dynamique des mesures expérimentales. Le modèle numérique décrit bien l'impact du puisage sur la diminution de la température de l'eau dans le ballon. L'écart moyen absolu entre la température simulée et la température mesurée est égal à 0,38°C avec un écart type de 0,3°C [Figure 7-44].

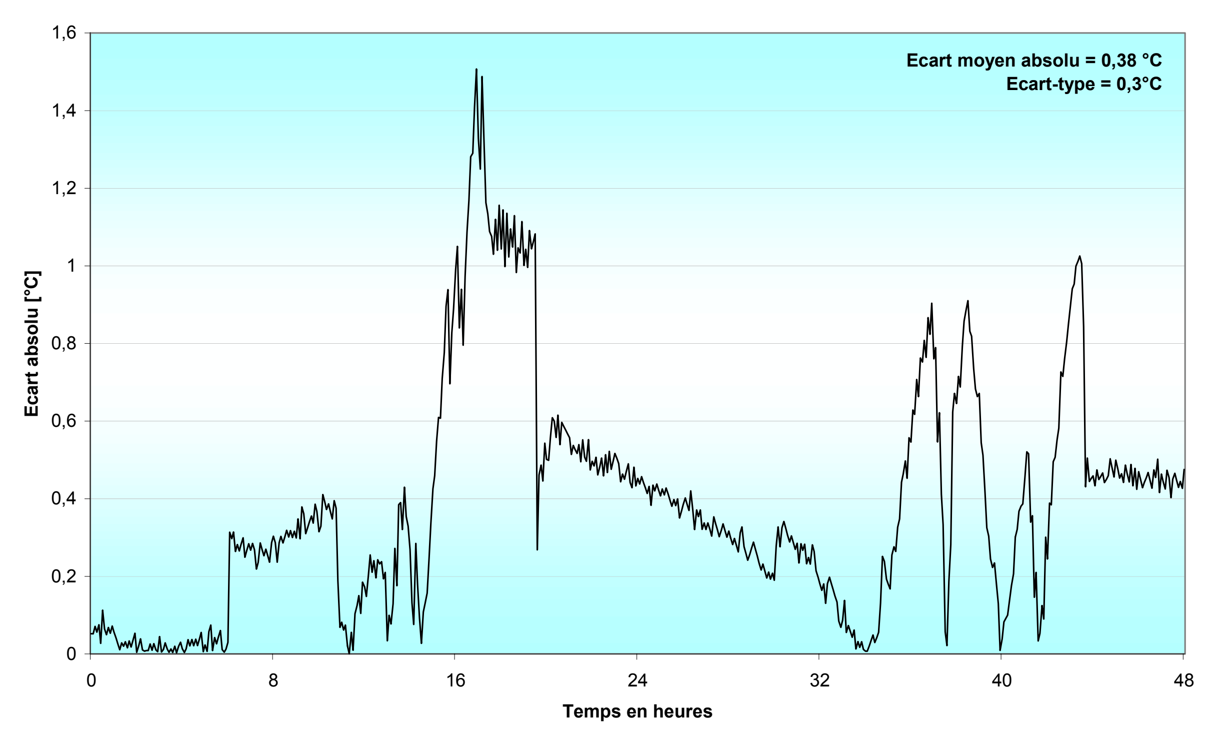


Figure 7-44 : Ecarts absolus de la température de l'eau dans le ballon entre les valeurs mesurées et simulées.

Nous pouvons ainsi constater que le modèle numérique permet d'étudier correctement la productivité énergétique du système solaire ayant le capteur noir intégré comme composant.

Les deux autres capteurs (avec les absorbeurs gris et vert) étant non lié au système solaire pendant cette période de mesure, ils sont dans des conditions de stagnation. Dans ces conditions, nous avons vu dans le chapitre précédent que la température de l'absorbeur du capteur intégré peut avoir un impact important sur la température de l'air à l'intérieur du bâtiment. Il paraît donc utile de confronter les valeurs simulées de la température moyenne de la plaque absorbante des capteurs intégrés en stagnation aux mesures obtenues par l'installation expérimentale.
La température moyenne de l'absorbeur du capteur vert simulée suit bien la dynamique de la température mesurée, avec des légers dépassements pendant les premières heures d'ensoleillement [Figure 7-45]. La température moyenne maximale est égale à 91,02°C par simulation et 92,60°C par mesure. La température minimale moyenne obtenue par simulation est 14,46°C et celle obtenue par mesure est très proche avec 14,30°C. La moyenne de la température de l'absorbeur pendant la période du test est égale à 40,35°C et celle obtenue par mesure ne dépasse pas les 39,26°C, et donc l'écart absolu sur la moyenne des simulations et mesures est de 1,09°C [Figure 7-46]. L'écart entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées est acceptable et permet de constater que le modèle numérique pourra être utilisé afin d'optimiser l'épaisseur de l'isolant dans le capteur pour éviter un impact significatif de l'intégration solaire sur l'ambiance intérieure du bâtiment.

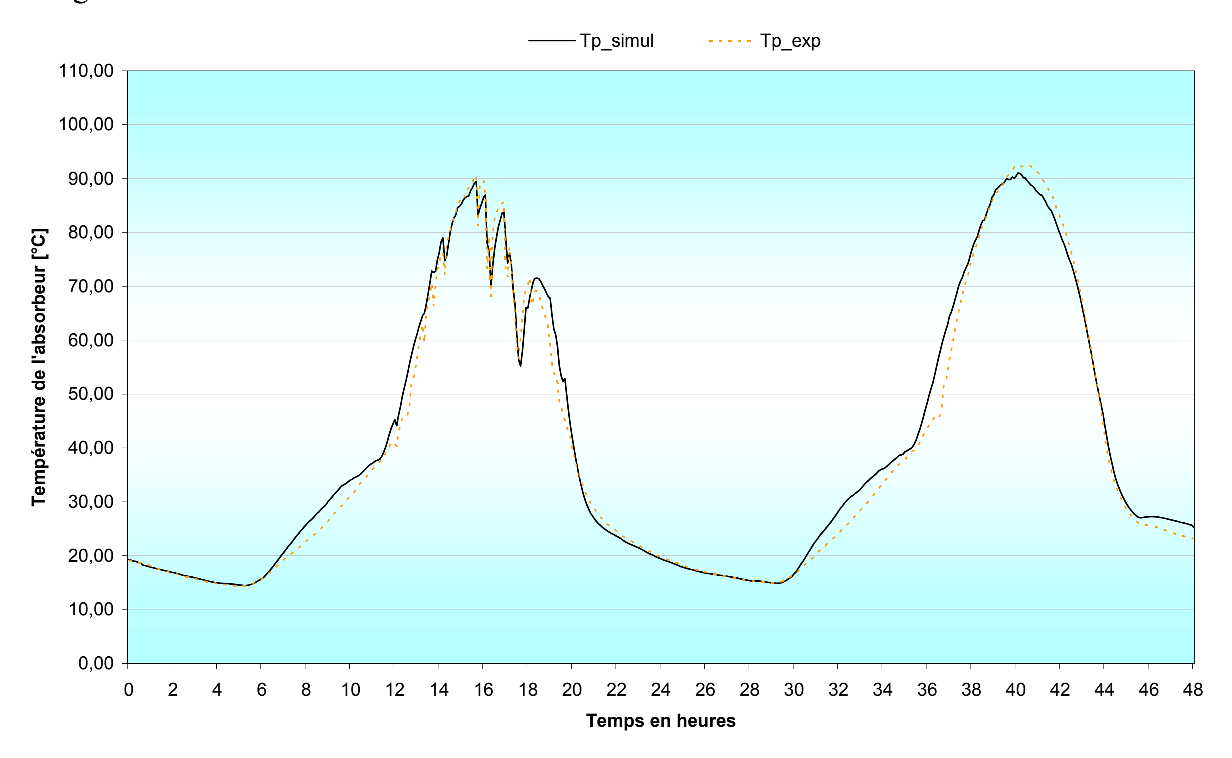


Figure 7-45 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur vert (13-14 juillet 2005).

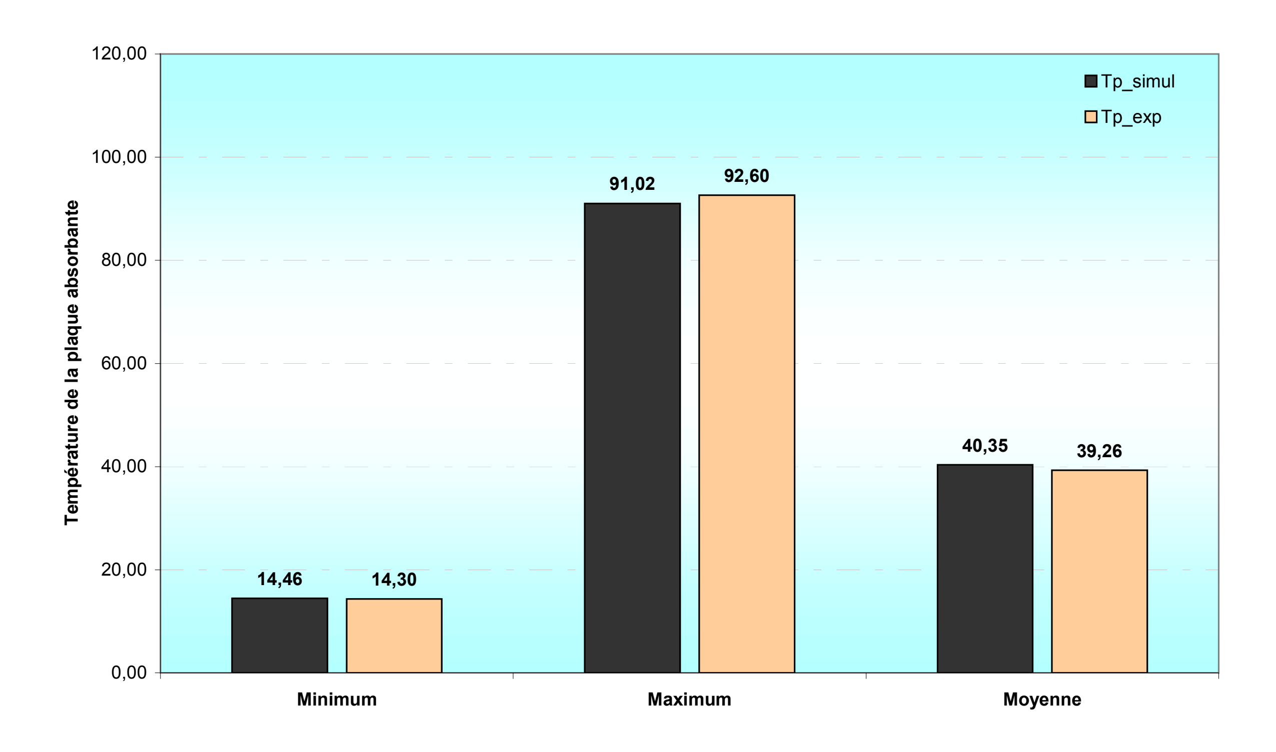


Figure 7-46 : Ecarts entre la simulation et l'expérimentation pour le capteur vert en stagnation.

Les mêmes observations peuvent être faites sur le capteur gris en stagnation. En effet, nous observons une dynamique proche entre les mesures et les simulations [Figure 7-47], et les écarts absolus entre les moyennes de températures permettent de montrer une bonne concordance entre le modèle numérique et l'expérimentation [Figure 7-48].

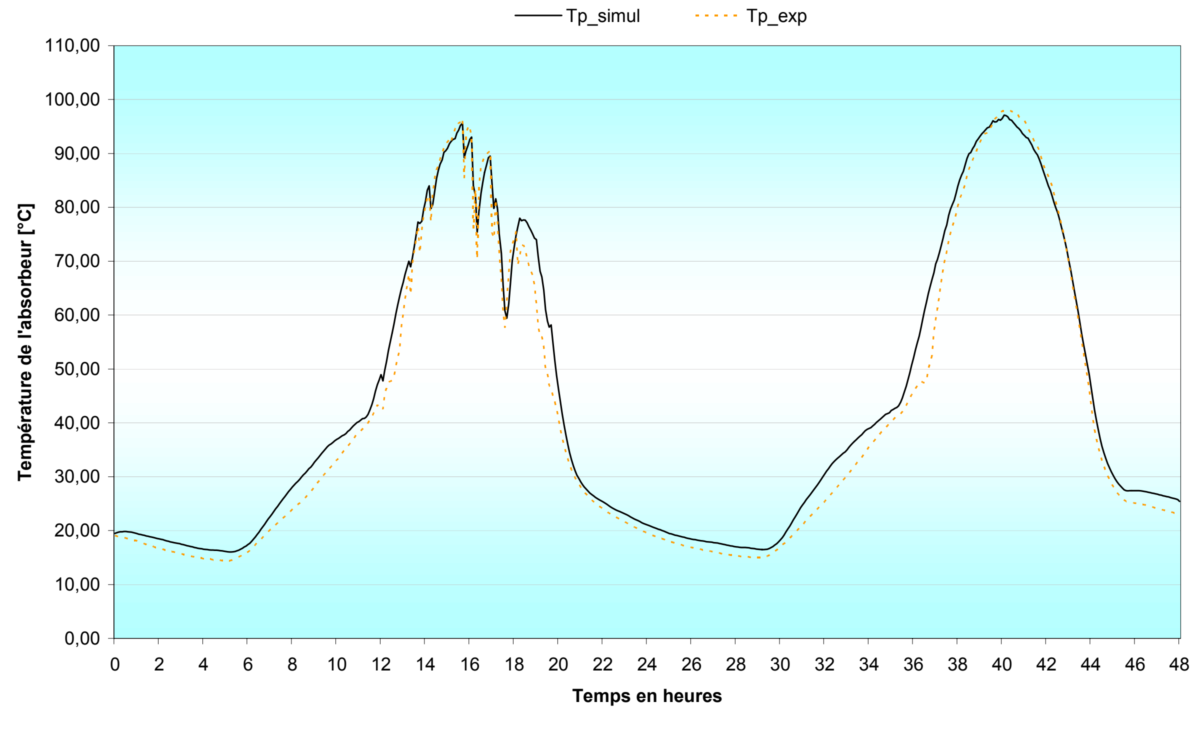


Figure 7-47 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur gris en stagnation (13-14 juillet 2005).

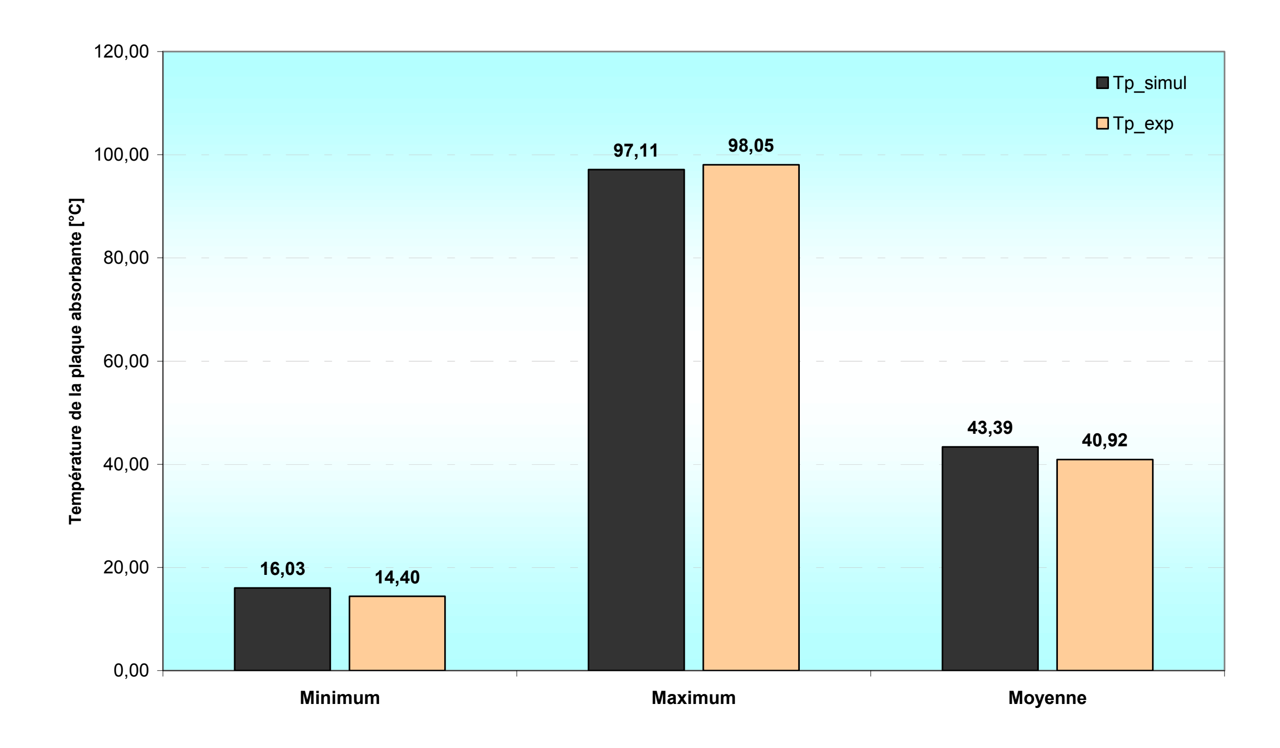


Figure 7-48 : Ecarts entre la simulation et l'expérimentation pour le capteur gris en stagnation.

7.9.2.2 Le capteur gris en production d'eau chaude

La même démarche de comparaison est suivie dans l'étude du système solaire ayant le capteur gris comme composant. La dynamique de la température d'eau simulée est très proche de la dynamique des mesures expérimentales [Figure 7-49].

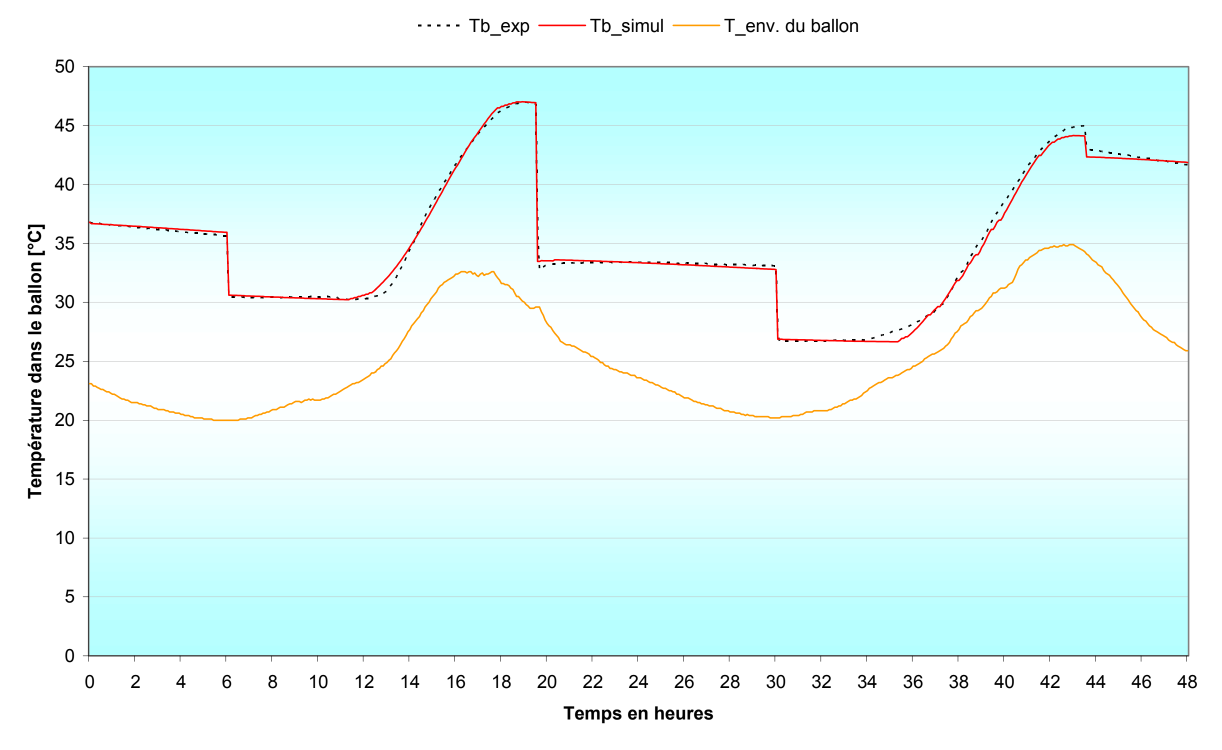


Figure 7-49 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon du stockage (20-21 juillet 2005).

Le modèle numérique développé permet donc bien d'étudier la productivité du capteur gris. L'écart moyen absolu entre la température simulée et la température mesurée pendant cette période de test est égal à 0,27°C avec un écart type de 0,26°C.

La simulation des températures moyennes des absorbeurs des capteurs noir et vert qui sont en stagnation pendant cette période de test donne des résultats très proches des données de mesures. La dynamique de la température simulée est très proche de celle de la température mesurée, pour les deux capteurs, avec des légers dépassements pendant les premières heures d'ensoleillement [Figure 7-50, Figure 7-51].

Dans le cas du capteur noir, la température moyenne maximale simulée est égale à 103,16 °C et celle mesurée à 104,05 °C. La température minimale moyenne obtenue par simulation est 14,89 °C, et celle obtenue par mesure est très proche avec 13,50 °C. La moyenne de la température de l'absorbeur pendant la période du test est égale à 42,47 °C et celle obtenue par mesure est légèrement inférieure à la valeur simulée avec 41,36 °C.

Dans le cas du capteur vert, les températures moyennes maximale et minimale de l'absorbeur obtenues par simulation sont respectivement égales à 88,89 °C et 14,62 °C, contre 89,00 °C et 13,40 °C obtenues par les mesures pendant la période de test correspondante. La température moyenne obtenue par simulation est 38,93 °C, et celle obtenue par mesure ne diffère pas trop de cette dernière avec une valeur de 37,11 °C.

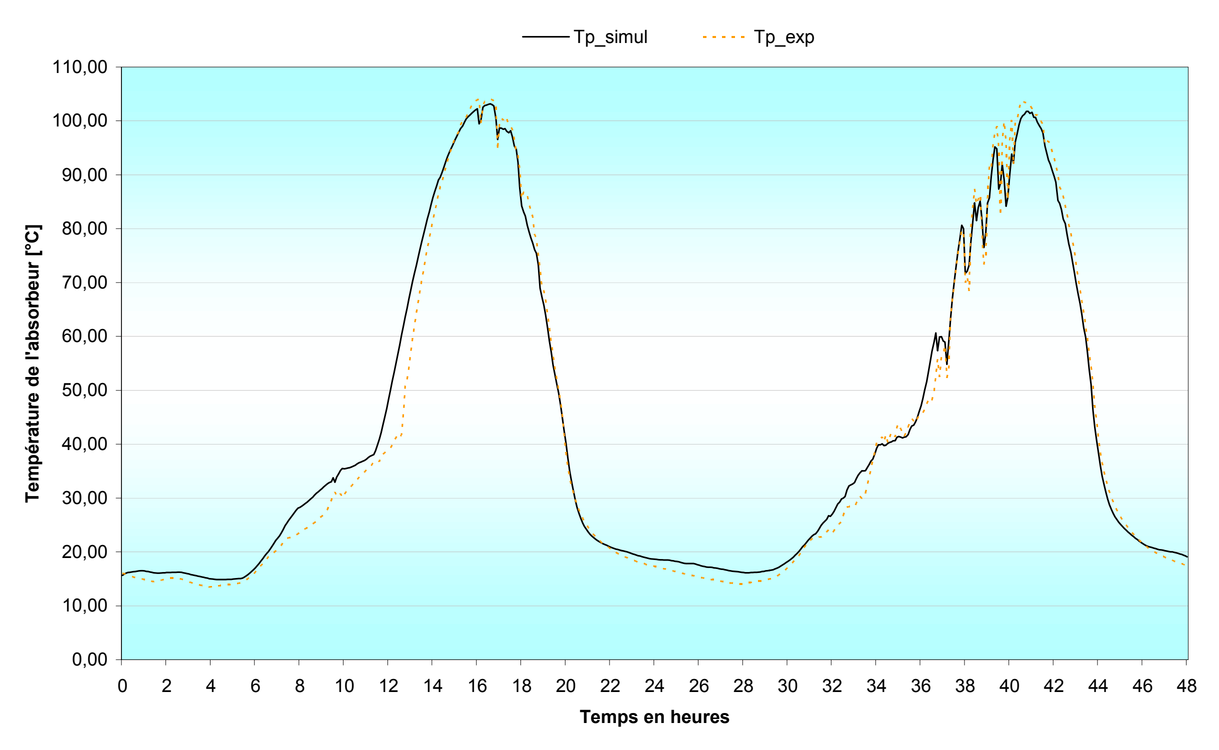


Figure 7-50 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur noir en stagnation (20-21 juillet 2005).

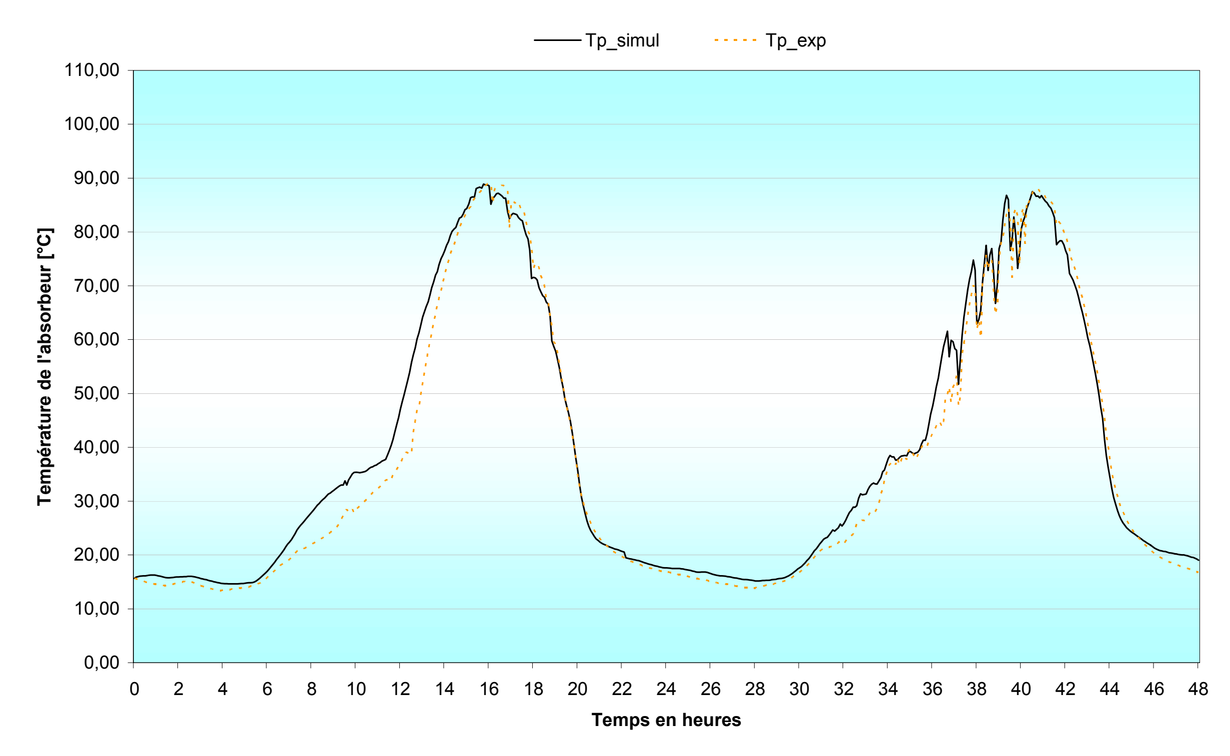


Figure 7-51 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur vert en stagnation (20-21 juillet 2005).

Comme dans le cas du cas précédent où le capteur noir faisait partie du système solaire, nous avons évalué le modèle numérique dans le cas du système solaire ayant le capteur gris intégré comme composant, et nous avons comparé le comportement thermique des capteurs en stagnation avec les données de mesures. La bonne concordance entre les divers résultats montre bien que le modèle numérique peut décrire le comportement du capteur solaire intégré.

7.9.2.3 Le capteur vert en production d'eau chaude

Afin d'étudier la productivité du système solaire ayant le capteur vert intégré comme composant, des simulations sont effectuées pendant deux jours, les 04 et 05 août 2005, et les résultats sont confrontés aux résultats des mesures effectuées sur la même période sur le site de l'expérimentation.

La Figure 7-52 illustre la moyenne de la température dans le ballon de stockage, obtenue grâce au capteur vert. Les valeurs de la simulation concordent bien avec les valeurs mesurées. L'écart moyen absolu entre la température simulée et la température mesurée pendant cette période de test est égal à 0,48°C avec un écart type de 0,34°C

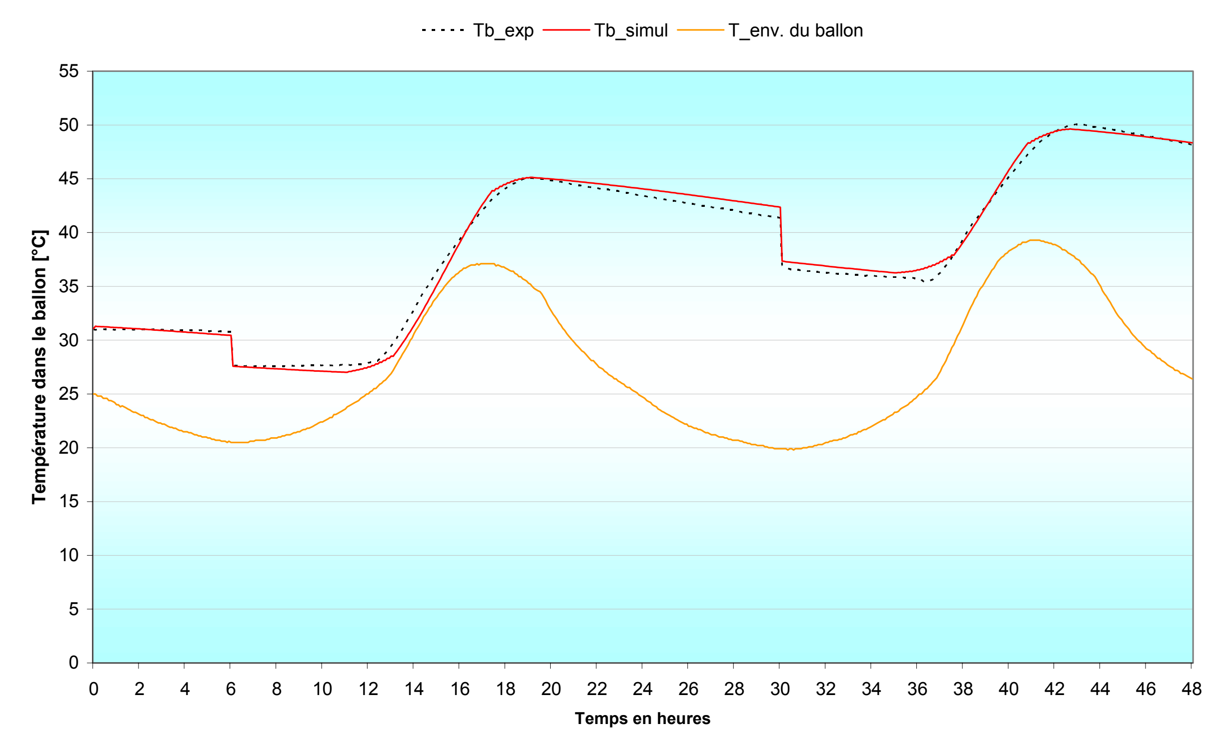


Figure 7-52 : Moyenne de la température de l'eau dans le ballon du stockage (04-05 août 2005).

Pendant cette même période, les capteurs ayant les absorbeurs noir et gris sont dans des conditions de stagnation. Les résultats des simulations effectuées montrent que les températures moyennes des absorbeurs des deux capteurs solaires intégrés suivent bien la dynamique de la température mesurée correspondant à chaque capteur, avec des légers dépassements pendant les premières heures d'ensoleillement [Figure 7-53,Figure 7-54].

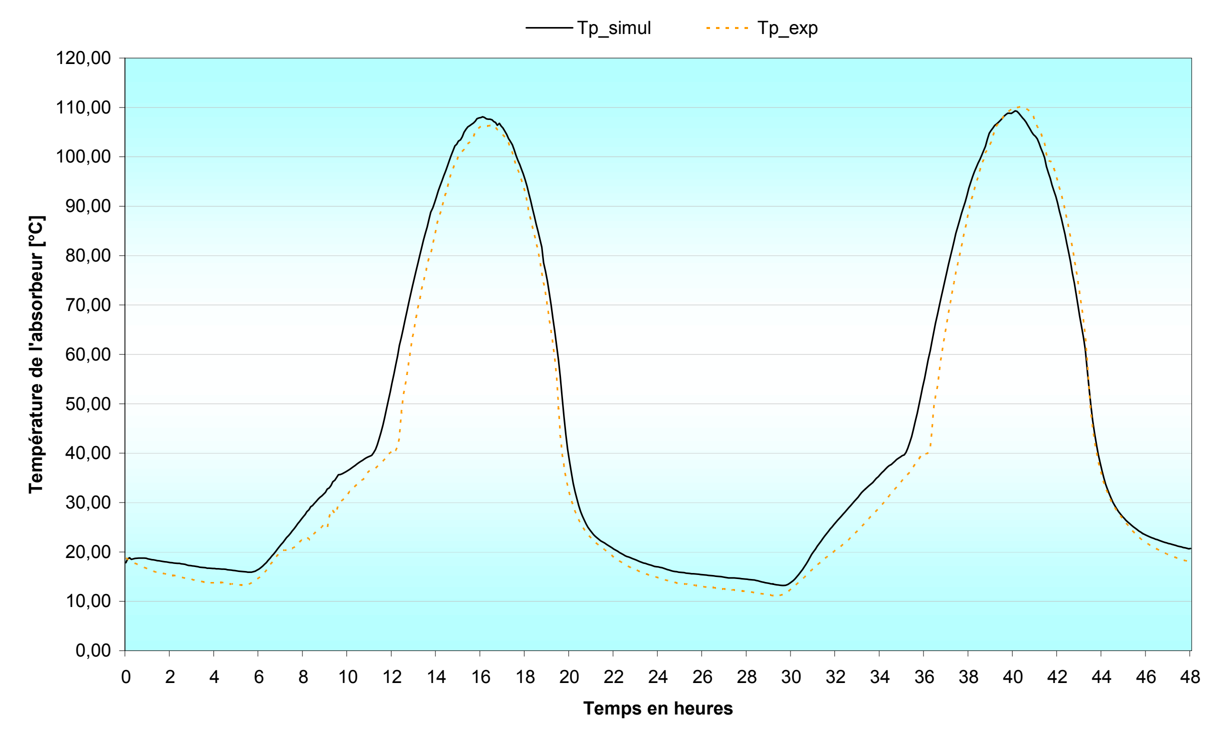


Figure 7-53 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur noir en stagnation (04-05 août 2005).

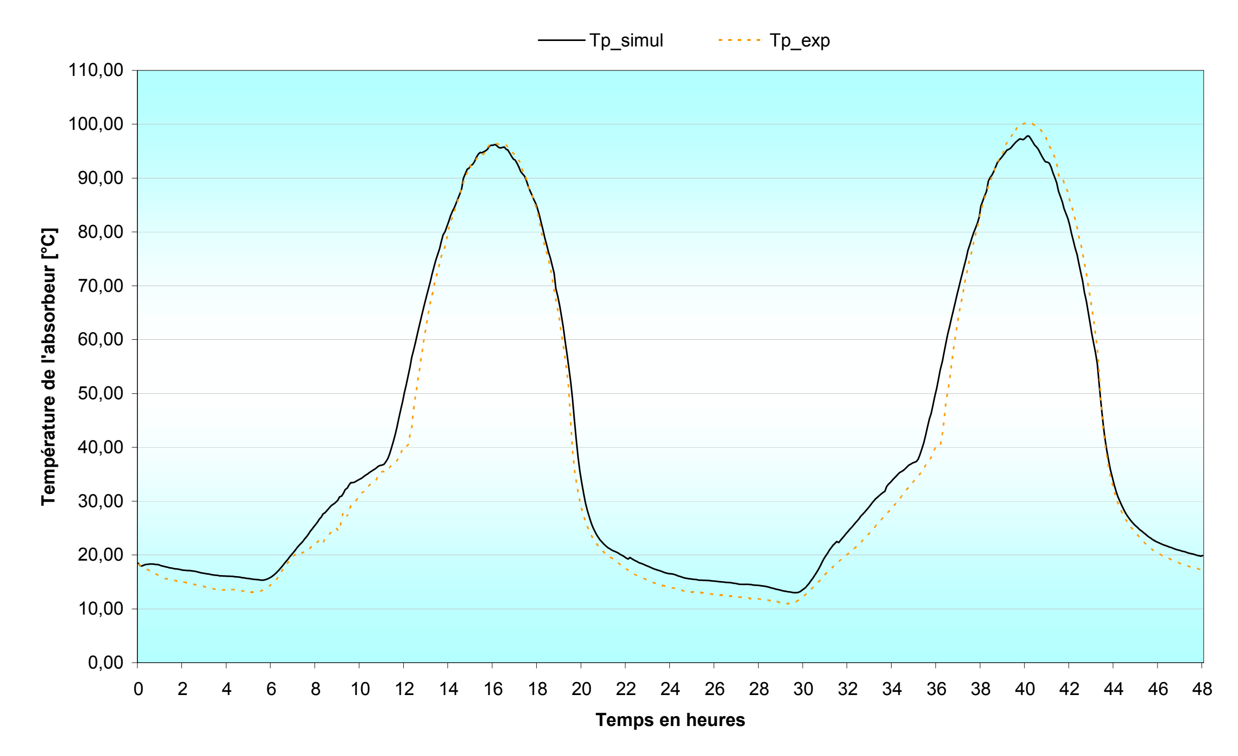


Figure 7-54 : Température moyenne de l'absorbeur du capteur gris en stagnation (04-05 août 2005).

Pour le capteur noir, la température moyenne maximale est égale à 109,31 °C par simulation et 110,15 °C par mesure. La température minimale moyenne obtenue par simulation est 13,21 °C, et celle obtenue par mesure est très proche avec 11,15 °C. La moyenne de la température de l'absorbeur pendant la période du test est égale à 44,89 °C et celle obtenue par mesure ne dépasse pas les 41,51 °C. Pour le capteur gris, les températures moyennes maximale et minimale de l'absorbeur par simulation sont respectivement égales à 97,84 °C et 13,00 °C, contre des mesures de 100,25 °C et 11,00 °C. La température moyenne obtenue par simulation est 41,07 °C, et celle obtenue par mesure ne diffère pas trop de cette dernière avec une valeur de 38,85 °C.

7.10 Conclusion

Après avoir étudié théoriquement et techniquement le système solaire afin de prévoir les capteurs de mesure nécessaires à l'expérimentation, nous avons installé et branché l'ensemble des sondes de mesures et des modules d'acquisition en même temps de la mise en place de l'installation du système solaire expérimental.

Ensuite, nous avons développé un programme de contrôle et d'acquisition de données de mesures sous LabVIEW, logiciel de programmation graphique. Ce programme remplit plusieurs tâches distinctes : il permet l'acquisition des données, la commande de l'électrovanne effectuant les puisages mais aussi et surtout l'enregistrement de l'ensemble de ces données.

Les premières acquisitions obtenues sur site ont validé le système expérimental mis en place. Le traitement des données recueillies par la suite a permis de connaître les performances de

l'installation et de chacun des capteurs prototypes. Le capteur noir, aux caractéristiques techniques les plus favorables, permet d'obtenir une bonne performance. Le capteur gris permet toutefois d'obtenir des performances assez proches malgré une couleur d'absorbeur moins favorable : sa structure en caisson et sa meilleure isolation compensent presque son défaut de couleur. Le capteur vert obtient lui des performances inférieures aux deux autres mais ces dernières restent néanmoins correctes.

La solution développée permet de capter de l'énergie solaire avec un surcoût minime : au coût de la façade traditionnelle doit être ajouté le prix de l'absorbeur (quelques dizaines d'euros par m^2 – environ 10 fois moins qu'un m^2 de capteur solaire traditionnel). L'utilisation d'absorbeurs de couleur sombre (vert sapin et gris noir) paraît tout à fait envisageable et devrait permettre d'offrir aux architectes plus de choix (même s'il reste encore limité) et de nouveaux produits.

L'installation expérimentale a permis de réaliser une confrontation entre les résultats de simulation issus du modèle numérique développé sous MATLAB et intégré dans TRNSYS, et les mesures expérimentales des trois capteurs solaires intégrés prototypes. Cette confrontation a abouti sur une bonne concordance et a permis de mettre en valeur la capacité du modèle à décrire le comportement thermique dynamique des capteurs solaires thermiques intégrés dans la façade.

Conclusion générale
Perspectives

Conclusion générale

Adopter une démarche d'intégration des composants solaires actifs dans le bâtiment est une manière significative de relever le défi du développement du marché solaire thermique, tout en contribuant à la diminution des émissions des gaz à effet de serre et des tensions financières et politiques liées aux risques sur les approvisionnements. Dans ce contexte, l'objectif de notre recherche était articulé en deux axes fondamentaux complémentaires: d'une part, le développement d'une méthode d'analyse prospective destinée à identifier des principes constructifs et des composants d'enveloppe innovants dans l'intégration technico-architecturale des équipements solaires thermiques, et d'autre part, l'étude de la modélisation et la conception d'un outil dynamique permettant de connaître la performance du système solaire ayant des composants intégrés et qui rende possible l'identification de l'influence de ces composants sur l'ambiance intérieure du bâtiment.

L'analyse de la problématique de l'intégration architecturale des composants solaires thermiques actifs dans le bâtiment nous a tout d'abord permis de constater que la qualité architecturale et la qualité du design des produits sont des facteurs primordiaux dans la réussite de l'intégration, que le composant solaire doit pouvoir être un composant de construction au même titre que d'autres, et qu'il s'avère essentiel de trouver un bon compromis entre l'installation technique (faisabilité et productivité) des systèmes solaires et leur intégration architecturale.

Une étude de la situation actuelle concernant la technologie du solaire thermique et les procédés constructifs du bâtiment nous a conduit, par le biais d'une analyse fonctionnelle des systèmes solaires thermiques et des matériaux et composants constructifs, à distinguer plusieurs éléments constructifs capables de recevoir des fonctions propres aux systèmes solaires thermiques, sans pénaliser leurs fonctions initiales. Cette analyse nous a permis d'établir une vingtaine de propositions d'intégration, dans le respect des normes correspondantes. Six propositions d'intégration dans la façade ont été sélectionnées et ont fait l'objet d'une étude de faisabilité et des détails de mise en œuvre ont été élaborés. L'évaluation et le développement de ces propositions d'intégration ont fait le sujet d'une application de la méthode d'analyse prospective développée par la suite.

Comme nous l'avons précisé, la première contribution principale de notre recherche a été de développer une méthode prospective d'analyse de l'intégration de ces systèmes dans le bâtiment, baptisée SISBat, permettant notamment d'évaluer la qualité de l'intégration et de proposer des perspectives d'évolution du composant solaire. Elle est conçue pour les architectes et les concepteurs, pour être adaptée au processus de conception et pour fournir des résultats interprétables et compréhensibles. En raisonnant sur le cycle de vie entier, une

grille d'analyse a été construite suivant un référentiel d'étude permettant de croiser les perspectives techniques, économiques, architecturales et environnementales et une structure méthodologique a été élaborée.
Afin d'obtenir une évaluation de la qualité d'intégration de sortie synthétique et lisible, sans pour autant réduire le nombre et le contenu des quarante-quatre critères d'analyse retenus, nous avons pris le parti de structurer hiérarchiquement les critères. Ceux-ci critères sont surclassés dans des familles de sur-critères appartenant à une étape de vie de l'élément solaire. La structure hiérarchique a l'avantage de permettre d'interpréter les résultats sur plusieurs niveaux comme cela a été fait dans l'application de SISBat aux six propositions d'intégration solaire retenues. Elle a permis non seulement d'évaluer ces propositions mais également de les comparer et de mettre en évidence leurs éventuelles possibilités d'amélioration.

La deuxième contribution essentielle du travail effectué a été la création d'un environnement de simulation de capteurs intégrés avec l'appui du logiciel TRNSYS, ceci permettant ainsi de modéliser l'essentiel des phénomènes transitoires. Bien que le système solaire soit considéré dans son ensemble, le travail s'est plutôt focalisé sur un des composants du système : le capteur. La modélisation dynamique nécessitait avant tout la création d'un nouveau modèle spécifique de capteur solaire intégré prenant en compte l'interaction capteur/bâtiment, dont les résultats ont été ensuite validés au sein d'un système de production d'eau chaude. En considérant la proposition d'intégration de composants solaires dans les façades à vitrage parclosé comme application, des simulations ont été effectuées sur des périodes, des climats et des configurations diverses. Les résultats ont pu mettre en évidence plusieurs points.
Une analyse paramétrique a montré que le coefficient d'absorption de l'absorbeur joue le rôle dominant dans le choix de la couleur de l'absorbeur par rapport à son coefficient d'émission. Ce résultat a été ensuite confirmé par des simulations effectuées dans le but de classer des couleurs choisies d'absorbeur suivant la performance thermique du capteur.
Nous avons montré aussi que le comportement des capteurs intégrés dans la façade d'un bâtiment ayant des absorbeurs colorés est comparable à celui du capteur noir traditionnel, et que les rapports des surfaces nécessaires à reproduire une quantité d'énergie équivalente à celle d'une installation traditionnelle sont pratiquement surmontables puisque, à l'encontre de la toiture, la surface nécessaire au captage est pratiquement disponible en façade. En effet, pour un capteur vertical intégré dans une façade orientée plein sud, les simulations ont donné un ratio de surface variant suivant la couleur de l'absorbeur de 1,6 à 2,3 par rapport à la surface d'un capteur traditionnel implanté sur la toiture et orienté vers le sud.
En plus, même si nous n'avons pas fait une étude du coût du composant, nous pouvons facilement conclure qu'il représente un avantage sur le plan économique. En effet, par rapport au capteur traditionnel, le capteur intégré dans la façade parclosé fournit une quantité d'énergie utile acceptable et représente un surcoût minime qui viendrait surtout de

l'intégration de l'absorbeur, l'isolant et les conduits dans la façade. Ceci devrait en général représenter un investissement bien inférieur à celui de l'achat de capteurs solaires traditionnels, et qui seront probablement perceptibles, moins esthétiques, et donc moins acceptables par les architectes, les maîtres d'oeuvre ou les usagers.
Nous avons pu ensuite mettre en évidence l'influence de l'intégration du composant solaire thermique intégré sur l'ambiance intérieure du bâtiment en étudiant les échanges thermiques entre le capteur et les locaux situés à l'arrière du module de façade. Cette étude a mis en évidence l'impact du capteur intégré sur l'évolution de la température d'air de la zone occupée derrière le capteur dans les conditions de fonctionnement normal et les conditions de stagnation, en comparaison avec une façade sans capteur. L'analyse a permis une estimation de l'épaisseur d'isolant nécessaire pour minimiser cet impact.

Enfin la proposition d'intégration étudiée numériquement fut concrétisée par la production de trois capteurs prototypes colorés et une expérimentation installée aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau. L'installation a été équipée de sondes de mesures, de modules d'acquisition et autres équipements techniques (électrovanne pour contrôler le puisage, débitmètre) pour la réalisation d'une étude de ces capteurs en conditions réelles d'utilisation. Un programme de contrôle et d'acquisition de données de mesures a été développé pour piloter cette expérimentation.
D'une part, l'analyse des données de mesures recueillies nous a permis de connaître les performances de l'installation et de chacun des capteurs prototypes. Les trois capteurs testés ont permis d'obtenir de bonnes performances. Le capteur ayant la plus petite absorptivité (absorbeur vert) a montré des performances inférieures aux deux autres mais ces dernières restent néanmoins correctes. Des mesures concernant la sécurité du produit ont été effectuées et ont montré que la température de surface derrière le capteur gris reste acceptable pour les usagers. Ces résultats ont confirmé l'intérêt de cette proposition d'intégration, sachant que ces capteurs intégrés et colorés permettent de plus de capter de l'énergie solaire avec un surcoût minime. L'utilisation d'absorbeurs de couleurs sombres (vert sapin et gris noir) s'est révélé comme tout à fait envisageable et devrait permettre d'offrir aux architectes plus de choix, même s'il reste encore limité, et de nouveaux produits.
D'autre part, l'installation expérimentale nous a permis de réaliser une confrontation entre les résultats de simulation issus du modèle numérique développé et les mesures expérimentales des trois capteurs solaires intégrés prototypes. Cette confrontation a abouti à une bonne adéquation et a permis de mettre en valeur la capacité du modèle à décrire le comportement thermique des capteurs solaires thermiques intégrés dans la façade.

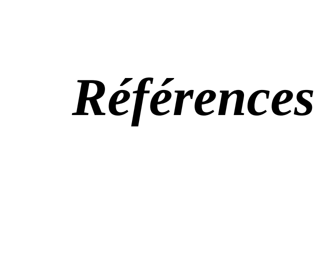
Perspectives

Le développement de la méthode prospective SISBat, qui s'inscrit dans une logique de développement durable, s'est avéré une tâche difficile, en raison de la situation complexe qui mêle les spécificités du secteur du bâtiment et celui des systèmes solaires thermiques. Même si les travaux présentés dans ce mémoire permettent aujourd'hui de témoigner de son fonctionnement à travers plusieurs cas étudiés, nous pouvons envisager plusieurs évolutions.
Il faut d'abord souligner le caractère subjectif d'un certain nombre d'éléments de la méthode. Dans le développement de la méthode, nous avons pu bénéficier d'observations et de conseils d'un certain nombre d'experts, notamment sur le recensement et la définition des variables, le remplissage des matrices et la détermination des notes affectées à chaque critère, ce qui a permis d'affiner et de justifier certains choix. Par ailleurs, il pourrait s'avérer intéressant, voire opportun, d'utiliser, dans les calculs des résultats, les règles de la logique floue, de telle sorte que soient représentés et traités le vague, l'imprécis et l'incertain. Quelques essais préliminaires ont été effectués, mais ils demandent à être poursuivis.
Dans le cadre de ce travail, nous avons restreint l'applicabilité de la méthode aux bâtiments neufs. Compte tenu de la politique actuelle de réhabilitation du parc existant en France pour améliorer les conditions de vie et diminuer les consommations énergétiques, il nous semblerait judicieux d'étendre le champ des applications à celui des projets de réhabilitation. Cette extension, si elle est conduite, ne peut se faire directement. Un projet de réhabilitation est caractérisé par le fait qu'il est conditionné, en partie, par le bâtiment existant, elle nécessitera des adaptations au niveau de la méthodologie, particulièrement au niveau de la mise en œuvre.
Il paraît judicieux, pour conclure sur cette partie, de pouvoir évaluer la méthode SISBat en l'appliquant à d'autres composants du système solaires (stockage et distribution), et à d'autres types de systèmes solaires thermiques (rafraîchissement solaire, plancher chauffant).

En ce qui concerne la modélisation numérique, une des pistes de développement futur pourrait être l'étude de l'incidence de ces systèmes sur les échanges entre les bâtiments et les microclimats urbains. Il s'agirait d'estimer le rôle que pourraient avoir les éléments capteurs sur le climat environnant, notamment le phénomène d'îlot de chaleur. Ceci pourrait être effectué par une analyse de sensibilité aux matériaux (caractéristiques, coefficients d'échange) et à la géométrie (canyon, bâtiment, masques) et par l'observation de l'évolution relative des températures diurnes et nocturnes.

La partie expérimentale pourrait également être étendue afin d'étudier d'une part le fonctionnement d'un champ d'éléments capteurs, d'autre part d'évaluer le comportement des capteurs en ambiance réelle. Ainsi la façade expérimentale pourrait être réaménagée en ajoutant un champ de capteurs avec une configuration hydraulique ajustable et en installant

une cellule à ambiance contrôlée à l'arrière d'une partie du champ. Cette dernière pourrait servir aussi à évaluer la capacité du modèle numérique développé à décrire l'impact de la présence des capteurs solaires dans le module de façade sur le confort et le comportement thermique interne des bâtiments.



Références

Références

ABU-ZOUR A. M., RIFFAT S. B. and GILLOT M. *New design of solar collector integrated into solar louvres for efficient heat transfer*. Applied Thermal Engineering, 2006, vol. 26, n°16, pp. 1876-1882.

ADRA N. *Proposition d'une procédure de certification énergétique des logements et application au contexte libanais*. Génie Civil. Lyon: INSA-Lyon, 2000, 326 p.

AFNOR. *Thermal solar systems and components - Factory mades systems - General requirements.* prEN. **12976-1:** 17 p.

AFNOR. *Thermal solar systems and components - Factory mades systems - Tests methods.* prEN. **12976-2:** 54 p.

AMER E. H., NAYAK J. K. and SHARMA C. K. *Transient test methods for flat-plate collectors: Review and experimental evaluation*. Solar Energy, 1997, vol. 60, n°5, pp. 229-243.

ARONS D. M. M. and GLICKSMAN L. R. *Double Skin, Airflow Façades: Will the Popular Model work in the USA?* ACE3 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Building Technology Program, Massachussetts Institute of thechnology, 2000, pp. 23.

ASHRAE. *Chapter 33: Solar energy equipments*. **In**: ASHRAE HVAC Systems and Equipments 2000. Atlanta, ASHRAE, pp. 33.1-33.22.

ASHRAE. *Chapter 32: Solar energy use*. **In**: ASHRAE HVAC Applications 1999. Atlanta, ASHRAE, pp. 32.1-38.28.

BAL J.-L. et CHABOT B. *Quelle place pour les énergies renouvelables? Futuribles,* 2006, n° 315, pp. 103-122.

BARBAT M. *Contribution au développement d'un contrôle optimal de la ventilation dans des locaux de grandes dimensions*. Conception en bâtiment et techniques urbaines. Lyon: INSA de Lyon, 2001, 218 p.

BENICHOU E. et HUNTZINGER J. R. *Introduction à LabVIEW.* Lyon: Université Lyon 1, 2004, 175 p.

BENY S. *Expérimentation et modélisation d'une installation solaire prototype*. Génie civil. Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005, 143 p.

BERGMANN I. *Façade integrated collectors - Constructions, building physics end the result of two monitored systems.* Industry Workshop. IEA-SHC Task 26, 2002, pp. 47-58.

BIENFAIT D. *Règles d'installation des équipements de production d'eau chaude sanitaire individuelle par l'énergie solaire.* Sophia Antipolis: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1983.

BRUANT M. *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance*. Conception en bâtiment et techniques urbaines. Lyon: INSA de Lyon, 1996, 269 p.

BRUANT M., GUARRACINO G., MICHEL P., et al. *Gestion technique et bâtiments bioclimatiques.* Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 1996, 151 p. (Ingénierie des ambiances thermiques).

CABRIOL T., PELISSOU A. et ROUX D. *L'insolateur plan à effet de serre et le chauffe eau solaire.* EDISUD. Aix-en-Provence, 1977, 159 p. (Technologies douces).

CANTIN R. *Développement d'une méthode prospective: Application aux systèmes de gestion technique du bâtiment*. Méthodes de Conception en Bâtiment et Techniques Urbaines. Lyon: INSA-Lyon, 2000, 320 p.

CASADEVALL A. *Introduction à MATLAB* **[en ligne].** Disponible sur: <http://docs.ufrmd.dauphine.fr/matlab/polyMatlab.pdf>. (Juillet 2006).

CATED. *Les équipements solaires dans le bâtiment.* Paris : Edition du Moniteur, 1983. (Documentation Française du bâtiment).

CERTU. *Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques : Le Confort Acoustique.* Nord Picardie: Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2003, 22 p.

CERTU. *Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques : Le Confort Thermique.* Nord Picardie: Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2003, 22 p.

CERTU. *Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques : Les Façades.* Nord Picardie: Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2003, 38 p.

CERTU. *Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques : Les Toitures.* Nord Picardie: Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2003, 46 p.

CHATAGNON N. *Développement d'une méthode d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments au stade de la conception*. Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Chambéry: Université de Savoie, 1999, 344 p.

CHEUNG L. et REJENET J. *Intégration architecturale de composants solaires*. V.A. Bâtiment. Vaulx en Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2006, 122 p.

CLAESSENS J. and DEHERDE A. *Active Solar Heating and Photovoltaics : Solar Energy in European Office Buildings.* **[en ligne].** Disponible sur: <http://erg.ucd.ie/mid_career/mid_career.html>. (Octobre 2004).

CLUB DE ROME. *Halte à la croissance? Rapport sur les limites de la croissance.* Paris: Fayard, 1972.

COLOMBO R., LANDABASO A. and SEVILLA A. *Passive solar architecture for mediterranean area.* Brussels: Commission of the European Communities, 1994, 175 p.

CORTESSE S. *Intégration architecturale et environnementale des composants solaires thermiques actifs dans des éléments de façade.* Paris: ADEME et PUCA, 2006, 235 p.

CSTB et ADEME. *Reglémentation Thermique 2000.* Paris: CSTB, 2001.

DESSUS B. et PHARABOD F. *L'énergie solaire.* Paris: Presse Universitaires de France, 2002, 128 p. (Que sais-je?, 1294).

DGEMP. *Bilan énergétique de l'année 2005 en France* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/pdf/bilan2005.pdf>. (Juin 2006).

DHARIWAL S. R. and MIRDHA U. S. *Analytical expressions for the response of flat-plate collector to various transient conditions*. Energy Conversion and Management, 2005, vol. 46, n°11-12, pp. 1809-1836.

DUFFIE J. and BECKMAN W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes.* Madison: John Wiley & Sons, Inc., 1980, 762 p.

DUMORTIER D. *Mesure, Analyse et Modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments*. Génie civil. Chambéry: Université de Savoie, 1995.

DURAND D. *La systémique.* 9° éd. Paris: Presse Universitaires de France, 2004, 127 p. (Que sais-je?, 1795).

DUTHU H., MONTHARRY D. et PLATZER M. *La technique du bâtiment: Tous corps d'état.* 3°édition. Paris: Le Moniteur, 2004, 732 p.

EL MANKIBI M. *Développement et évaluation numérique et expérimentale de stratégies de régulation de la ventilation hybride*. Systèmes Thermiques et Aérauliques. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003, 388 p.

ENERPLAN. *L'actualité du marché solaire en France.* La Seyne / Mer, 2006, 15 p.

ESPACE INFO D'ENERGIE DU PAYS D'AIX. *Guide pour l'intégration architecturale des capteurs solaires thermiques* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.agglo-paysdaix.fr/publications.htm>. (Février 2006).

ESTIF. *Solar thermal markets in Europe : Trends and market statistics 2004.* Bruxelles, 2005, 8 p.

EUROBAROMETRE. *Attitudes au sujet de l'énergie.* Bruxelles: Commission Européenne, Janvier 2006, 75 p.

EUROBSERV'ER. *Baromètre du solaire thermique*. *Systèmes solaires,* 2005, n° 168, pp. 39-51.

EUROBSERV'ER. *Le baromètre Européen 2005 des énergies renouvelables.* Paris: Systèmes Solaires, 2005, 32 p.

FETON L. *L'enjeu des doubles façades dans la construction*. Vaulx-en-Velin: ENTPE, 1999, 110 p.

GIORDANO J. INDUSTRIES. *Manuel d'installation du chauffe-eau solaire Giorsol.* 36 p.

GOBERT L. *Evaluation de l'offre domotique - Développement d'une grille d'analyse.* Génie civil et bâtiment. Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 1991, 106 p.

GODET M. *Manuel de prospective stratégique - Tome1 : Une discipline intellectuelle.* Paris: DUNOD, 1997, 260 p.

GODET M. *Manuel de prospective stratégique - Tome2 : L'art et la méthode.* Paris: DUNOD, 1997, 359 p.

GRATIA E. and HERDE A. D. *Natural ventilation in a double-skin façade*. Energy and Buildings, 2003, n°36, pp. 137-146.

GUARRACINO G. *Energétique du bâtiment.* Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2001.

GUIAVARCH A. *Etude de l'amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires.* Cergy Pontoise: Université de Cergy Pontoise, 2003, 314 p.

HATEM F. *La prospective: pratiques et méthodes.* Economica. Paris, 1993.

HENSEN J., BARTAK M. and DRKAL F. *Modeling and Simulation of a double-skin Façade System* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.bwk.tue.nl/fago/hensen/publications/02_ashrae_dskin.pdf>. (March 2004).

HERANT P. *Parvenir au facteur 4 : le secteur des bâtiments existants.* Forum des entreprises et du développement durable, Paris. ADEME, 2006, pp. 8.

HETZEL J. *Haute qualité environnementale du cadre bâti. Enjeux et pratiques.* AFNOR, 2003, 292 p.

JANNOT Y. *Thermique solaire* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.librecours.org/>. (Septembre 2004).

JOFFRE A. *Energie solaire thermique dans le bâtiment. Chauffe-eau solaires.* Techniques de l'ingénieur. Paris, 2004, pp. 18.

JOUVENEL H. D. *La démarche prospective - Un bref guide méthodologique*. Futuribles, 1999, vol. 11, pp. 47-66.

JURCACKOVA L. *Perspective d'intégration des composants solaires thermiques dans les éléments construits*. Génie civil et bâtiment. Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2002, 81 p.

KALOGIROU S., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. and SOULIOTIS M. *Performance of solar systems employing collectors with colored absorber*. Energy and Buildings, 2005, vol. 37, n°8, pp. 824-835.

KALOGIROU S. A. *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, vol. 30, n°3, pp. 231-295.

KOO J.-M. *Development of a flat-plate solar collector design program*. Mechanical engineering. Madison: University of Wisconsin, 1999, 93 p.

KREIDER J. F. and KREITH F. *Principles of Solar Engineering.* McGraw-Hill. Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1978.

KREIDER J. F. and KREITH F. *Solar energy handbook.* New York: McGraw-Hill, 1981.

KREIDER J. F. and KREITH F. *Solar heating and cooling.* McGraw-Hill. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1982, 479 p.

LABOURET A. et VILLOZ M. *Energie solaire photovoltaïque.* Le Moniteur 2°éd. Paris: Dunod, 2005, 303 p. (Série Environnement et sécurité).

LE MOIGNE J. L. *La modélisation des systèmes complexes.* 2° éd. Paris: Dunod, 1999, 178 p.

LEPELTIER S. *Plan climat 2004 : Face au changement climatique agissons ensemble* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/plan_climat.pdf>.

LEULEU R. *Transferts de chaleur.* Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique. Paris: Techniques de l'ingénieur, 1992, pp. 16.

LHOMME J. C. *Les énergies renouvelables.* 2° éd.: Delachaux et Niestlé, 2004, 256 p. (La bibliothèque du naturaliste).

LHOMME J. C. *La maison économe.* Paris: Delachaux et Niestlé, 2005, 192 p.

LIBES M. *LabVIEW - Support de cours.* Marseille: Ecole supérieure d'ingénieurs de Luminy, 2004.

LONCOUR X., WOUTERS P., FLAMANT G., et al. *Impact of Double Ventilated Façades in Buildings.* CIB2004 World Building Congress, 2004.

LOUTZENHISER P. G., MANZ H., FELSMANN C., et al. *Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation*. Solar Energy, 2006.

MAIO F. D. and PAASSEN A. H. C. V. *Integration of HVAC systems and double façades in buildings.* **In**: ENTPE. Energy Efficient & Healthy Buildings in sustainable cities, October, Lyon, FRANCE. ENTPE, 2002, pp. 469-474.

MATUSKA T. and SOUREK B. *Façade solar collectors*. Solar Energy, 2006 ,vol. 80, n°11, pp. 1443-1452.

MICHEL P. *Domotique et Habitat : Essai de lecture systémique.* Energétique. Lyon: INSA-Lyon, 1994, 133 p.

MUGNIER D. *Rafraîchissement solaire de locaux par sorption : Optimisation théorique et pratique*. Energétique. Paris: Ecole des Mines de Paris, 2002, 266 p.

MURESAN C., MENEZO C., BENNACER R., et al. *Numérical simulation of vertical solar collector : Radiation and turbulent natural convection coupling.* CHT-04 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, April 2004, Bergen (Norway).

OLIVE G. et TRIBOULET A. *Guide de l'eau chaude dans les bâtiments résidentiels et tertiaires : conception et calcul des installations.* PYC. Ivry-sur-Seine, 1991, 141 p. (Collection des guides de l'AICVF).

OLMO F. J., VIDA J., FOYO I., et al. *Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance*. Energy, 1999, vol. 24, n°8, pp. 689-704.

PERI G. *Les capteurs convertisseurs héliothermiques sans concentration.* Editions Européennes Thermique et Industrie. Paris, 1977, 75 p. (Cahiers A.F.E.D.E.S, 4).

PEUPORTIER B. *Eco-conception des bâtiments.* Les Presses de l'Ecole des Mines. Paris: Ecole des Mines de Paris, 2003, 276 p.

PEUSER F. A., REMMERS K.-H. et SCHNAUSS M. *Installations solaires thermiques : Conception et mise en oeuvre.* Le Moniteur. Paris: Systèmes Solaires, 2005, 403 p.

PLAN DU FUTURE. *Le système constructif Styltech*. CSTB, Avis Technique 2/04-1108, 2005, pp. 35.

RADANNE P. *Accepter le nouveau siècle*. Futuribles, 2006, n°315, pp. 5-13.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique.* Paris: Journal officiel n°163, 2005, 29 p p.

ROCLENDORF G. and JANSSEN S. *Façade integrated solar collectors.* Solar World Congress, Jerusalem, 1999.

ROSNAY J. D. *Le macroscope : Vers une vision globale.* Paris: Seuil, 1975.

SALAGNAC J. L. et CHATRY M. *Styltech: procédé constructif à base d'ossature acier.* Plan Urbanisme Construction Architecture -Chantier 2000. Paris, 2000, 29 p.

SALEM T. *Développement et paramétrage d'un modèle pluridisciplinaire de l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments d'enseignement*. Génie Civil. Lyon: INSA de Lyon, 2002, 127 p.

SALEM T., PIERRE M., MAYER D., et al. *Integration of active thermal solar components in facade elements.* **In**: S. E. a. B. P. Laboratory. CISBAT 2005, Lausanne. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, pp. 245-250.

SANTAMOURIS M. *Energy and climate in the urban built environment.* Mat Santamouris. London: James & James, 2001, 401 p.

SFEIR A. et GUARRACINO G. *Ingénierie des systèmes solaires.* Technique & Documentation. Paris, 1981, 266 p.

SOLAR ENERGY LABORATORY. *TRNSYS : A Transient Simulation Program.* Madison, University of Wisconsin.

SOUSA R. D. *Intégration des installations solaires thermiques.* Génie civil et bâtiment. Vaulx-en-Velin: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2003, 61 p.

STABAT P. *Modélisation de composants de systèmes de climatisation mettant en oeuvre l'adsorption et l'évaporation d'eau*. Energétique. Paris: Ecole des Mines de Paris, 2003, 296 p.

STEC W. and PAASSEN D. V. *Defining the Performance of the Double Skin Façade with the Use of the Simulation Model* **[en ligne].** Disponible sur: <http://www.ocp.tudelft.nl/et/Research/EnergyInBuiltEnvironment/SecondSkinFacade/DSF/publication.htm>. (Mars 2004).

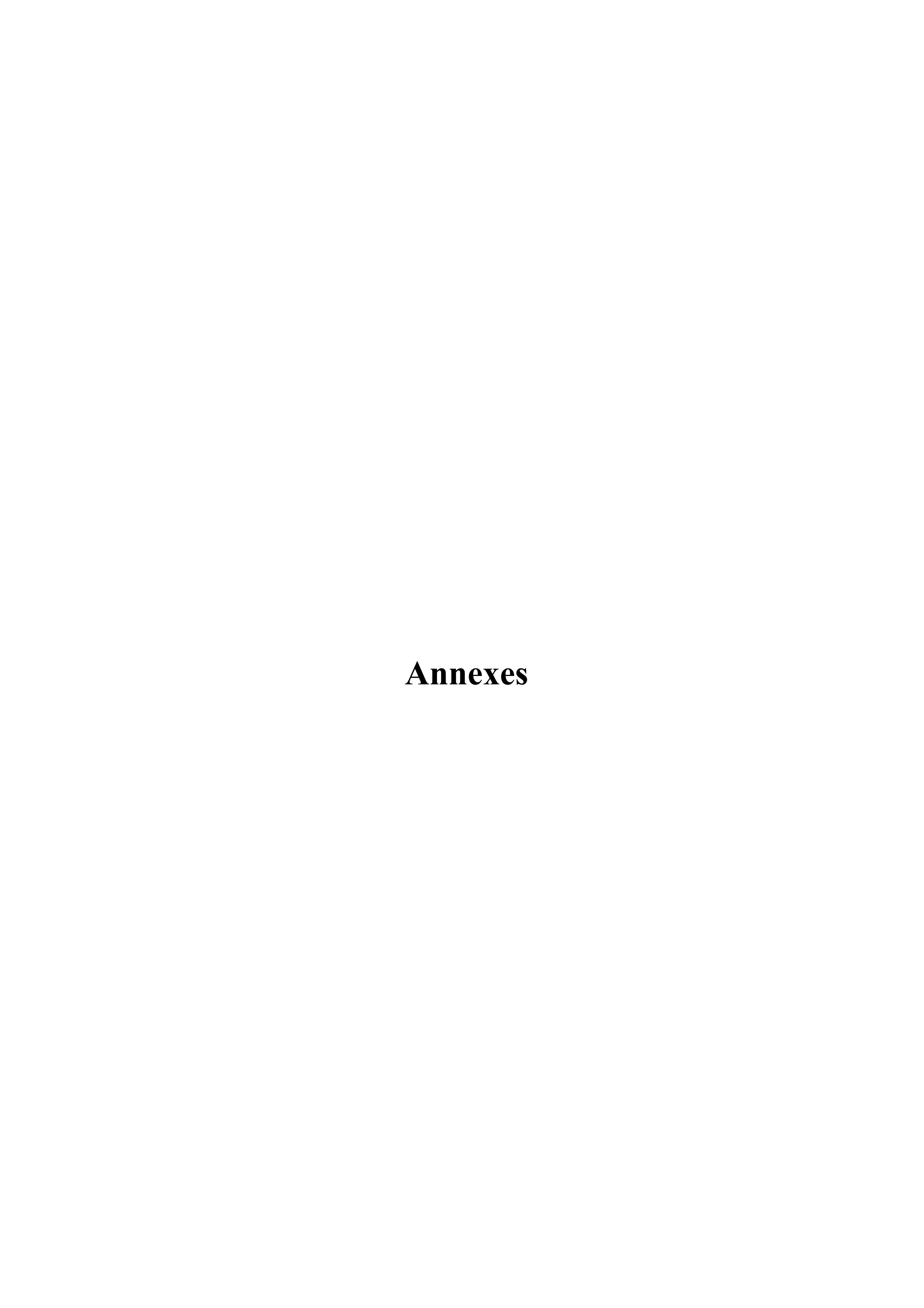
TECSOL. *Eau Chaude Solaire: Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives.* Paris: ADEME, 2002, 110 p.

VERNIER J. *Les énergies renouvelables.* 3° éd. Paris: Presse Universitaires de France, 2005, 127 p. (Que sais-je?, 3240).

WEISS W. and STADLER I. *Facade integration - A new and promoissing oppurtinity for thermal solar collectors.* Industry Workshop. IEA-SHC Task 26, 2001.

Liste des Figures

Liste des Tableaux



Annexes

Annexe A
(de la partie I)

A.1 Etat de lieu des solutions d'intégration existantes

A.1.1 Intégration en toiture




Figure A-1-1 : Appartements à Freiburg (Allemagne) [Source Cortesse S.]



Figure A-1-2 : Maison individuelle à Besançon (Francee) [Source Bonnet C..] (www.ademe.fr)



Figure A-1-3 : Maison individuelle à l'Autriche [Source Cortesse S.] (www.aks-doma.com)



Figure A-1-4 : Maison individuelle à l'Autriche [Source Cortesse S.] (www.aks-doma.com)



Figure A-1-5 : Piscine Municipale de Montmellian (France) [Source De Sousa R.]
(www.tecsol.fr)



Figure A-1-6 : Maison dans l'ILLE et Vilaine en Bretagne (France) [Source Cortesse S.]
(www.outilssolaires.com)



Figure A-1-7 : Maison dans l'ILLE et Vilaine en Bretagne (France) [Source Cortesse S.]
(Installateur : SMIDO)
(www.outilssolaires.com)



Figure A-1-8 : Maison dans la Loire Atlantique en Pays de la Loire (France) [Source Cortesse S.]
(Installateur : Bruno MERAND)
(www.outilssolaires.com)



Figure A-1-9 : Maison individuelle (AIE) [Source De Sousa R.]

A.1.2 Intégration en façade



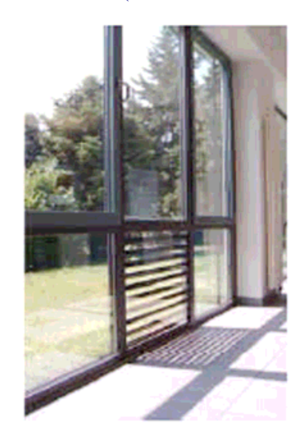
Figure A-1-10 : Maison individuelle Bordeaux – Régis Daurel architecte [Source Cortesse S.]
(Architecture à vivre n°23 mars avril 2005)



Figure A-1-11 : Maison à Bregenz (Autriche) [Source Cortesse S.]



Figure A-1-12 : Maison à Bonndorf (Suisse) [Source Cortesse S.]
(Architektur-Preis Einfamilienhäuser, édition Reiners Stiftung)





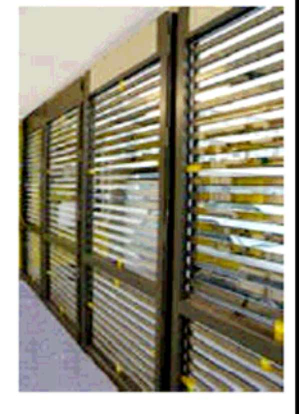


Figure A-1-13 : Produit Robin Sun (France) [Source Cortesse S.]

(www.insa-strasbourg.fr/robinsun/france/robin-sun-fr)



Figure A-1-14 : Palais des Beaux-Arts, Lille - Jean-Marc Ibos et Myrto Vitart : architectes [Source Cortesse S.]





Figure A-1-15 : Maison à Nenzing (Autriche) [Source Cortesse S.]
(www.aks-doma.com)



Figure A-1-16 : Refuge bioclimatique en Alpes (France) [Source Bonnet C.]
(http://solar club.web.cern.ch/solar-club/visites/visite13.htlm)

A.1.3 Intégration dans les éléments du bâtiment



Figure A-1-17 : Intégration de capteurs sous-vide dans les gardes-corps [Source Bonnet C.]



Figure A-1-18 : Maison dans l'Hérault en Languedoc Roussillon (France) [Source Cortesse S.]
(Installateur : Christian MARY)
(www.outilssolaires.com)



Figure A-1-19 : Kollektoranlage an Hausfassade (SULGEN Suisse) [Source Cortesse S.]



Figure A-1-20 : Maison dans l'Ariège en Midi Pyrénées (France) [Source Cortesse S.]
(Installateur : EFI)
(www.outilssolaires.com)





Figure A-1-21 : Habitation et commerce à Zürich (Suisse) [Source Cortesse S.]



Figure A-1-22 : Immeuble locatif (Vy d'Etra, 67) [Source Bonnet C.]

(http://www.solar.agentur.ch/solarpreis1999/neuenburg1.htm)

A.1.4 Intégration dans le paysage

Figure A-1-23 : Maison à Cotignac, Var - Bertrand Bonnier : architecte [source Cortesse S.]
(http://www.alternatives-energetiques.com)



Figure A-1-24 : Maison à Cotignac, Var - Bertrand Bonnier : architecte [source Cortesse S.]
(http://www.alternatives-energetiques.com)

Annexe B
(de la partie II)

B.1 La méthode d'analyse structurelle

Un système se présente sous la forme d'un ensemble d'éléments en relation. La structure du système est importante pour comprendre son évolution puisqu'elle conserver une certaine permanence.

La méthode d'analyse structurelle poursuit ainsi deux objectifs complémentaires : se doter d'une représentation aussi exhaustive que possible du système étudié, et réduire la complexité du système aux variables essentielles. Elle constitue un outil de structuration des idées et de la réflexion sur le problème posé et crée un langage commun pour une réflexion prospective.

C'est une technique d'analyse de système qui se penche sur le domaine étudié en procédant par étapes successives : le recensement des variables descriptives du système et de son environnement et leur explication, le repérage des relations entre ces variables et la recherche des variables essentielles ou clés [Godet N, 1997].

B.1.1 Recensement des variables

La première étape de l'analyse structurelle consiste à identifier une liste la plus exhaustive possible des variables, caractérisant le système constitué par le phénomène étudié et son environnement, aucune voie de recherche n'est a priori exclue, et tous les moyens de brainstorming et de créativité son bons.

Il conviendra toutefois de distinguer chacune des variables selon qu'elle est interne ou externe :

- Les variables internes étant celles qui caractérisent le système ;
- Les variables externes étant celles qui constituent son environnement.

La définition de la frontière distinguant les variables internes des variables externes peut être difficile à définir, étant donné les multiples flux d'information, de matière et d'énergie, entre le système et son environnement. C'est pourquoi la définition des variables, en limitant le nombre d'interprétations des variables, s'avère essentielle.

B.1.2 Mise en relation des variables

Dans une vision systémique, une variable n'existe que par les relations qu'elle entretient avec les autres variables. C'est pourquoi la deuxième étape de l'analyse structurelle consiste à repérer les relations entre variables, en utilisant un tableau à double entrée appelé matrice d'analyse structurelle du système.

Chacun des éléments matriciels représente une liaison d'une variable sur une autre variable. Pour construire la matrice d'analyse structurelle, il est donc nécessaire de s'interroger sur la nature de l'influence directe qui existe entre chacune des variables. Le remplissage de la matrice est qualitatif. Toutefois, il convient, avant de conclure à l'existence d'une liaison entre deux variables, de répondre systématiquement à trois questions [Figure B-1-1]:

1. Y a t il bien influence directe de la variable i sur la variable j ou bien la relation n'est-elle pas plutôt de j vers i ?
2. Y a t il influence de i sur j ou bien Y a t il pas colinéarité, une troisième variable k agissant sur i et j ?
3. La relation de i à j est-elle directe ou bien passe-t-elle par l'intermédiaire d'une autre variable r de la liste ?

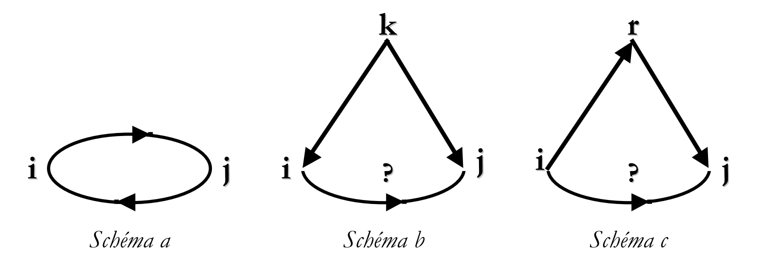


Figure B-1-1 : Types d'influence de i sur j.

La mise en relation des variables nécessite donc de se poser, pour n variables : $3n.(n-1)$ questions (c'est-à-dire plus de 2600 questions pour 30 variables).

Cette procédure d'interrogation relativement laborieuse permet non seulement d'éviter des erreurs (en vérifiant systématiquement l'existence d'une véritable liaison directe entre deux variables), mais aussi de redéfinir les variables et donc, d'affiner l'analyse du système.

Il est dès lors possible de construire une matrice carrée, dans laquelle chaque i-ème ligne correspond aux actions directes de la variable i sur les autres variables, placées sur les colonnes. Chaque élément matriciel de coordonnées (i, j) est alors affecté d'une valeur, notée a_{ij}, traduisant l'intensité, selon une échelle définie, de l'action directe de la variable i sur la variable j [Figure B-1-2]:

- $a_{ij}=0$ s'il n'existe pas de relation directe de i vers j ;
- $a_{ij}>0$ s'il existe une relation directe de i vers j.

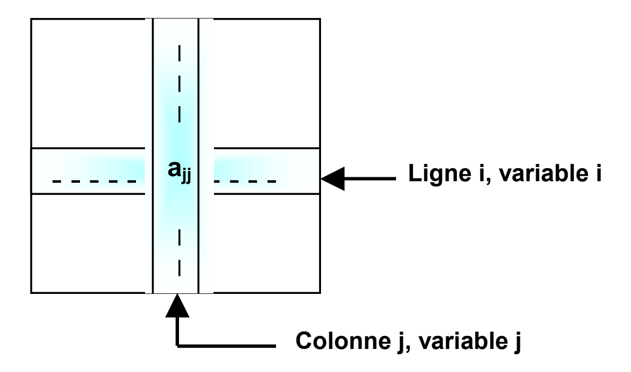


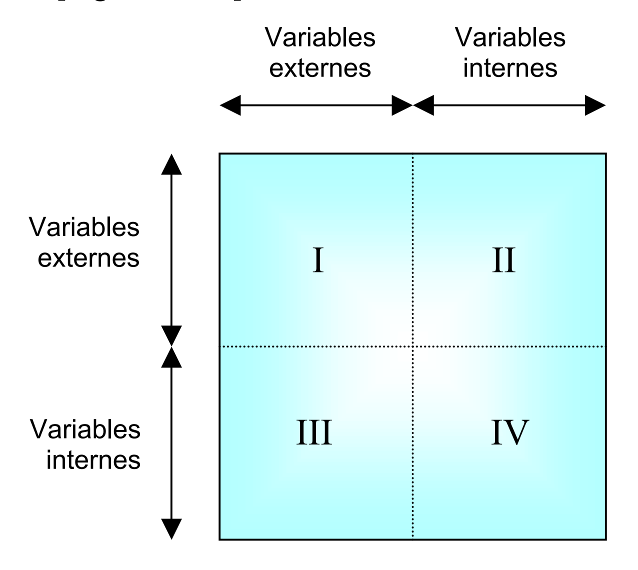
Figure B-1-2 : Représentation matricielle.

La matrice d'analyse structurelle peut être remplie de deux manières différentes :

- En lignes : il faut pour cela noter pour chaque ligne i l'influence de i sur les autres variables ;

- En colonnes : il s'agit ici de noter pour chaque colonne j, par quelles variables j est influencé.

La matrice, telle qu'elle a été définie, est se compose de 4 sous – matrices, comme l'indique le schéma suivant [Figure B-1-3] :



I *Influence des variables externes sur elles-mêmes*
II *Influences des variables externes sur les variables internes*
III *Influences des variables internes sur les variables externes*
IV *Influences des variables internes sur elles-mêmes*

Figure B-1-3 : forme de la matrice.

Il est préférable que le taux de remplissage de la matrice soit compris entre 15% et 25%, suivant les dimensions de la matrice : des taux supérieurs à 30% pourraient en effet être révélateurs d'un remplissage excessif : des relations induites ayant été, à tort, considérées comme directes.

B.1.4 Recherche des variables essentielles

Cette étape consiste à identifier les variables essentielles au moyen d'un classement direct déterminé à partir de la motricité et de la dépendance de chaque variable [Figure B-1-4]:

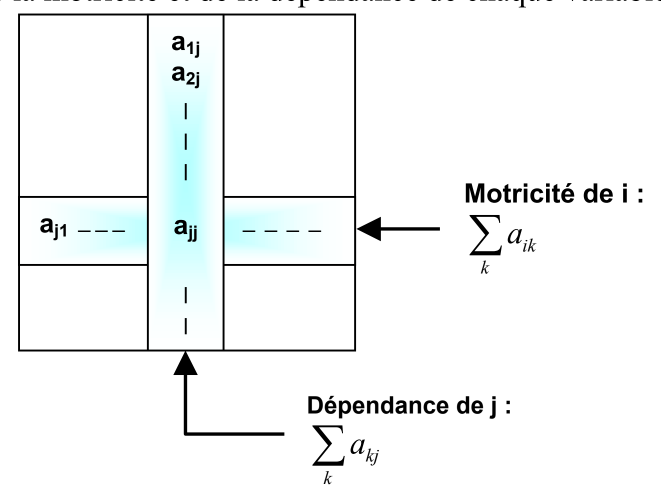


Figure B-1-4 : Définition de la motricité et de la dépendance.

La motricité d'une variable correspond à la somme des actions que cette variable a sur les autres variables, c'est-à-dire la somme des valeurs notées dans la matrice sur la ligne relative à cette variable.
La dépendance d'une variable correspond à la somme des actions que cette variable subit des autres variables, c'est-à-dire la somme des valeurs notées dans la matrice sur la colonne relative à cette variable.
La motricité directe d'une variable est déterminée par son caractère influent :

- Une variable sera d'autant plus motrice qu'elle aura de l'influence sur les autres variables ;
- Elle sera en revanche d'autant plus dépendante qu'elle sera influencée par les autres variables.

La représentation de chacune des variables sur le plan motricité – dépendance, ayant pour abscisse la dépendance et pour ordonnée la motricité, permet de classer les variables selon le rôle qu'elles jouent dans le système [Figure B-1-5].

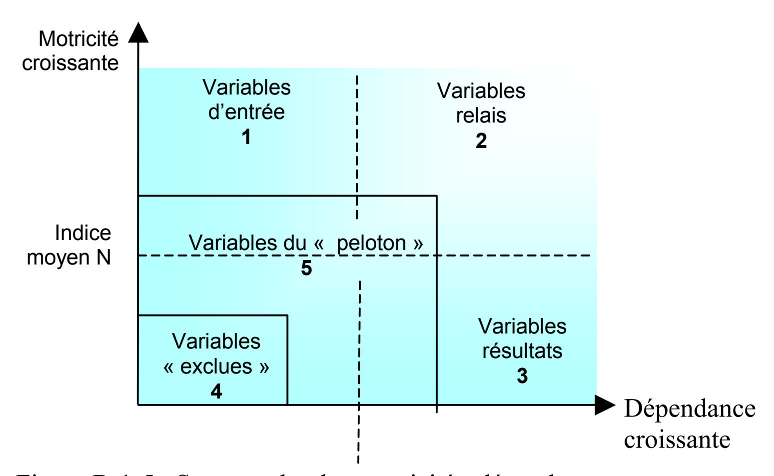


Figure B-1-5 : Secteurs du plan motricité - dépendance.

Ce plan influence - dépendance peut être divisé en cinq secteurs [Godet M, 1991] :

- Secteur 1 : les variables sont très motrices et peu dépendantes. Ce sont des variables explicatives qui conditionnent le reste du système ;
- Secteur 2 : les variables sont à la fois très motrices et très dépendantes. Ce sont des variables relais par nature instables. En effet, toute action sur ces variables aura des répercussions sur les autres et un effet retour sur elles-mêmes ;
- Secteur 3 : les variables sont peu motrices et très dépendantes. Ce sont des variables résultats dont l'évolution s'explique par les variables des secteurs 1 et 2 ;
- Secteur 4 : les variables sont peu motrices et peu dépendantes. Ces variables constituent des tendances lourdes ou des facteurs déconnectés du système avec lequel elles n'ont que peu de liaisons, en raison e leur développement relativement autonome ;
- Secteur 5 : les variables sont moyennement motrices et/ou dépendantes.

B.1.5 Classement direct et classement indirect

La matrice d'analyse structurelle, telle qu'elle est définie dans la partie « Mise en relation des variables », ne traduit que les influences directes qui existent entre les variables du système. Or, il peut exister entre ces variables, des actions dites indirectes.
En effet, si une variable i influence directement une variable k et si cette variable k influence directement une autre variable j, alors, tout changement affectant la variable i peut avoir une répercussion sur la variable j : il existe donc une relation indirecte entre i et j [Figure B-1-6].

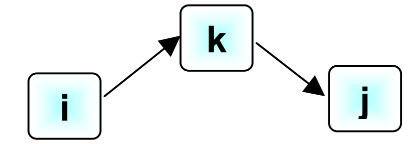


Figure B-1-6 : Action indirecte de i sur j.

Afin de déceler les variables qui peuvent être importantes, compte tenu des liaisons indirectes, et de mieux comprendre la dynamique du système, il est possible d'utiliser une méthode de multiplication matricielle appliquée à la matrice structurelle. Cette méthode appelée méthode MICMAC (Matrice d'Impacts Croisés - Multiplication Appliquée à un Classement) vise à étudier la diffusion des impacts par les chemins et les boucles de réaction, et hiérarchiser les variables selon les deux ordres de motricité et de dépendance, en tenant compte du nombre de chemins de longueur 1, 2,…, n, qui respectivement sont issus de chaque variable ou arrivent sur chaque variable.
La méthode MICMAC est basée sur les propriétés des matrices booléennes. En effet, en supposant qu'il existe dans la matrice d'analyse structurelle, notée M, de nombreuses relations indirectes du type i vers j et que le classement direct ne permette pas de prendre ces relations en considération, l'élévation au carré de la matrice donne :

$$M^2 = M \times M = \left(a_{ij}^{\ 2} \right) \qquad \text{avec : } a_{ij}^{\ 2} = \sum_k a_{ik} a_{kj} \quad \text{et} \quad \forall (i,j) : \left(a_{ij} \geq 0 \right)$$

Si a_{ij}^2 n'est pas nul, alors, il existe au moins un k tel que : aik.akj ≠ 0 ; ce qui signifie qu'il existe au moins une variable intermédiaire k telle que la variable i agit sur k ($a_{ik}>0$) et k agit sur j ($a_{kj}>0$) ; d'où l'existence d'un chemin d'ordre 2 allant de i vers j. C'est ainsi que l'élévation au carré de la matrice d'analyse structurelle met en évidence les relations d'ordre 2 qui peuvent exister entre tout couple de variables [Figure B-1-7].

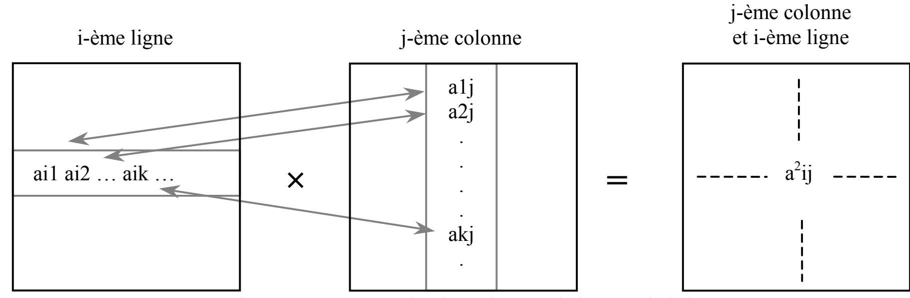


Figure B-1-7 : Principe du produit matriciel.

De la même façon, l'élévation successive de la matrice en puissance permet de souligner les chemins d'influence d'ordre 3, 4, …, n, reliant les variables entre elles. A partir d'un certain ordre, l'élévation en puissance n'a plus d'effet sur la hiérarchie des variables. Cela signifie que toutes les actions indirectes ont été repérées. Le classement indirect des variables peut dès lors être établi.

La comparaison de la hiérarchie des variables dans les deux classements (direct et indirect) est riche d'enseignement : elle permet en effet de confirmer l'importance de certaines variables, mais également de dévoiler des variables qui, du fait de leurs actions indirectes, jouent un rôle prépondérant dans le système (ce que le classement direct ne peut traduire).

B.1.6 Utilités et limites

La méthode d'analyse structurelle a pour but d'aider le décideur et non de prendre sa place. Elle ne consiste pas en une description précise de la structure et du fonctionnement du système, mais bien en une mise en évidence des variables clés, et donc des grands traits de l'organisation du système.

Aussi, il convient d'utiliser les résultats en considérant les limites de l'analyse. La première limite concerne le caractère subjectif de la liste de variables : le nombre de variables ne pouvant excéder quelques dizaines, des sous-variables ayant trait à une même dimension du problème peuvent avoir été regroupées. La seconde limite provient de l'aspect subjectif du remplissage de la matrice et de l'intensité donnée aux liaisons entre les variables.

Il est à noter que ces limites sont d'autant plus conséquentes, dans le cadre du présent travail, que la méthode d'analyse structurelle devrait normalement être réalisée par un groupe de travail composé d'acteurs et d'experts du domaine considéré : le travail pourrait alors bénéficier des expériences et points de vue de chacun des intervenants. Chacun des débats pourrait ainsi s'avérer extrêmement enrichissant pour l'analyse.

B.2 L'évaluation des solutions proposées

Cette partie a pour objet d'affecter une note n_{ck} à chaque critère c_k. Un tableau pour chaque proposition permet de justifier la note attribuée aux critères. Certains critères étant similaires à chaque principe constructif, des notes sont redondants.

B.2.1 Mur en maçonnerie type III

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration du mur maçonnerie de type III [Figure B-2-1].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Nous utiliserons ici des matériaux performants afin d'optimiser le rendement sachant que celui-ci ne sera pas optimum (position verticale du capteur).
2- Faisabilité technique	3	Réalisation simple. Elément préfabriqué.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Elément totalement préfabriqué.
4- Facilité d'installation	3	Eléments à visser et à « clipser » sur place sur la maçonnerie.
5- Optimisation du positionnement	2	Capteurs verticaux – donc le rendement n'est pas optimum.
6- Adéquation en terme d'espace	3	Surface adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	3	Remplacement d'un panneau de pierre par démontage puisque ceux-ci sont vissés ou « clipsés » sur la maçonnerie.
9- Adéquation en terme de poids	3	L'ajout du capteur ne crée pas une surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphiés ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours.
11-Modulation	3	Taille des panneaux ajustable en fonction des besoins : hauteur ou largeur au grès de l'envie de l'architecte afin qu'ils puissent s'harmoniser avec les panneaux en pierre alentour
12- Performance thermique	2	Rendement satisfaisant grâce au choix de matériaux performants. Mais l'inclinaison n'est pas adaptée pour un rendement optimal.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé devra être à circulation forcée, avec une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de contrôler le système.
14- Optimisation de la configuration	1	Il sera possible de placer des stores pour limiter la stagnation.
15- Limitation des pertes	3	Limitation des pertes assurées par l'isolation par laine de roche.
16- Fonction acoustique	3	La laine de roche et le mur (parpaing, béton) sert d'isolant acoustique.
17- Fonction isolation thermique	3	Isolation assurée par un isolant en façade intérieur pour l'isolation du bâtiment. Le capteur dispose d'un isolant intégré afin de minimiser les pertes.
18- Fonction structurelle	0	N'assure pas de fonction structurelle puisqu'elle se pose sur la maçonnerie.
19- Sécurité d'usage	1	Risques de brûlures si le panneau est accessible par une fenêtre ou autre.

Critères	Notes	Observations
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	2	Système accessible par l'extérieur uniquement.
22- Facilité d'intervention	2	Une difficulté pour le démontage et l'accès à l'accroche entre le panneau capteur et le collecteur situé en arrière.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Verre résistant.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.
26- Facilité de déconstruction	3	Système entièrement démontable.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les capteurs sont de taille standard selon les panneaux en pierre existants
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.
33- Coût de l'installation	3	La mise en place est très aisée.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	2	L'intégration ne risque pas de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	3	Puisque la production de chaleur par le système solaire devrait être relativement importante, la durée annuelle de fonctionnement de l'appoint devrait être minimale. C'est pourquoi l'impact environnemental de l'exploitation devrait être infime.
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsable » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	3	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	3	Les panneaux capteurs peuvent être facilement remplacés par des panneaux en pierre, ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les panneaux, laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Figure B-2-1 : Notation n_{ck} du mur maçonnerie de type III.

B.2.2 Bardage acier simple

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration du bardage acier [Figure B-2-2].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Nous utiliserons ici des matériaux performants afin d'optimiser le rendement sachant que celui-ci ne sera pas optimum dû la position verticale du capteur.
2- Faisabilité technique	3	Réalisation simple. Elément préfabriqué.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Elément totalement préfabriqué.
4- Facilité d'installation	3	Eléments à visser et à « clipser » sur place sur la maçonnerie
5- Optimisation du positionnement	2	Capteurs verticaux – donc le rendement n'est pas optimum.
6- Adéquation en terme d'espace	3	Surface adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	3	Remplacement d'un bardage par démontage puisque ceux-ci sont vissés ou « clipsé » sur la structure en acier.
9- Adéquation en terme de poids	1	L'ajout du capteur risque de créer une surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphie ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours.
11-Modulation	3	Taille des panneaux ajustable en fonction des besoins : hauteur ou largeur au grès de l'envie de l'architecte afin qu'ils puissent s'harmoniser avec le bardage alentour.
12- Performance thermique	2	Rendement satisfaisant grâce au choix de matériaux performants. Mais l'inclinaison n'est pas adaptée pour un rendement optimal.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé devra être à circulation forcée, avec une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de contrôler le système.
14- Optimisation de la configuration	1	Il sera possible de placer des stores pour limiter la stagnation.
15- Limitation des pertes	3	Limitation des pertes assurées par l'isolation par laine de roche
16- Fonction acoustique	3	La laine de roche et le mur (parpaing, béton) sert d'isolant acoustique.
17- Fonction isolation thermique	3	Isolation assurée par l'isolant du capteur.
18- Fonction structurelle	0	N'assure pas de fonction structurelle puisqu'elle se pose sur la structure acier.
19- Sécurité d'usage	1	le panneau peut être accessible par les usager à travers une fenêtre ou autre.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	2	Système accessible par l'extérieur uniquement.
22- Facilité d'intervention	2	Une difficulté pour le démontage et l'accès à l'accroche entre le panneau capteur et le collecteur situé en arrière.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Verre résistant.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.

Critères	Notes	Observations
26- Facilité de déconstruction	3	Système entièrement démontable de la structure acier.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les capteurs sont de tailles variables selon les besoins architecturaux.
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.
33- Coût de l'installation	3	La mise en place est très aisée.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	2	L'intégration ne risque pas de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	3	Puisque la production de chaleur par le système solaire devrait être relativement importante, la durée annuelle de fonctionnement de l'appoint devrait être minimale. C'est pourquoi l'impact environnemental de l'exploitation devrait être infime.
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsage » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	3	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	3	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par un bardage, ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les panneaux laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Figure B-2-2 : Notation n_{ck} du bardage acier.

B.2.3 Allège de fenêtre dans une façade légère

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration de l'allège [Figure B-2-3].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Nous utiliserons ici des matériaux performants afin d'optimiser le rendement sachant que celui-ci ne sera pas optimum dû la position verticale du capteur.
2- Faisabilité technique	3	Réalisation simple. Elément préfabriqué.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Elément totalement préfabriqué.
4- Facilité d'installation	3	Eléments à visser et à « clipser » sur place sur la structure.
5- Optimisation du positionnement	3	Capteurs inclinés – donc le rendement bon.
6- Adéquation en terme d'espace	3	Surface adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	3	Remplacement d'une allège par démontage puisque ceux-ci sont vissés ou « clipsé » sur la structure.
9- Adéquation en terme de poids	2	L'ajout du capteur risque de créer une petite surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage.
11-Modulation	3	Taille des panneaux ajustable en fonction des besoins : hauteur ou largeur au grès de l'envie de l'architecte afin qu'ils puissent s'harmoniser avec les éléments alentour.
12- Performance thermique	3	Rendement satisfaisant grâce au choix de matériaux performants. L'inclinaison peut s'adaptée pour un rendement optimal.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé devra être à circulation forcée, avec une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de contrôler le système.
14- Optimisation de la configuration	2	Possibilité de modifier la configuration du système pendant les saisons différentes.
15- Limitation des pertes	3	Limitation des pertes assurées par l'isolation par laine de roche.
16- Fonction acoustique	3	La laine de roche sert d'isolant acoustique.
17- Fonction isolation thermique	3	Isolation assurée par l'isolant du capteur.
18- Fonction structurelle	0	Pas de fonction structurelle puisqu'elle se pose sur la structure.
19- Sécurité d'usage	1	la surface du capteur plus accessible dû à l'inclinaison.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	2	Système accessible par l'extérieur et intérieur.
22- Facilité d'intervention	2	Montage et démontage possible par l'intérieur.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Verre résistant.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.
26- Facilité de déconstruction	3	Système entièrement démontable de la structure.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.

Critères	Notes	Observations
31- Coût de la fabrication	2	Les capteurs sont de tailles variables selon les besoins architecturaux.
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.
33- Coût de l'installation	3	La mise en place est très aisée.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	1	L'intégration risque de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	3	Puisque la production de chaleur par le système solaire devrait être relativement importante, la durée annuelle de fonctionnement de l'appoint devrait être minimale. C'est pourquoi l'impact environnemental de l'exploitation devrait être infime.
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsage » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	3	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	3	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par une allège, ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les panneaux laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Figure B-2-3 : Notation n_{ck} de l'allège.

B.2.4 Façade panneau en maçonnerie

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration de la façade panneau [Figure B-2-4].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Nous utiliserons ici des matériaux performants afin d'optimiser le rendement sachant que celui-ci ne sera pas optimum dû la position verticale du capteur.
2- Faisabilité technique	1	Il est difficile de réaliser l'isolation par l'extérieur.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Elément préfabriqué.
4- Facilité d'installation	2	Eléments à visser et à « clipser » sur place.
5- Optimisation du positionnement	2	Capteurs verticaux – donc le rendement n'est pas optimum.
6- Adéquation en terme d'espace	3	Surface adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.

Critères	Notes	Observations
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	2	Remplacement d'un panneau par démontage du panneau existant.
9- Adéquation en terme de poids	2	L'ajout du capteur risque de créer une petite surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphie ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours.
11-Modulation	3	Taille des panneaux ajustable en fonction des besoins : hauteur entre nez de dalle ou largeur dans la structure porteuse.
12- Performance thermique	2	Rendement satisfaisant grâce au choix de matériaux performants. Mais l'inclinaison n'est pas adaptée pour un rendement optimal.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé devra être à circulation forcée, avec une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de contrôler le système.
14- Optimisation de la configuration	1	Il sera possible de placer des stores devant les capteurs pour limiter la stagnation.
15- Limitation des pertes	3	Limitation des pertes assurées par l'isolation par laine de roche.
16- Fonction acoustique	2	Etude préalable à établir pour les parois légères. La laine de roche sert d'isolant acoustique.
17- Fonction isolation thermique	3	Isolation assurée par un isolant spécialement dimensionné pour assurer cette fonction pour le bâtiment mais aussi pour le capteur afin de limiter les pertes.
18- Fonction structurelle	1	N'assure pas de fonction structurelle puisqu'elle se pose en panneau.
19- Sécurité d'usage	1	Risques de brûlures si le panneau est accessible par une fenêtre ou autre.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	2	Système accessible par l'intérieur.
22- Facilité d'intervention	2	Une légère difficulté pour le démontage.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Plaque de cuivre fragile (difficulté de mise en oeuvre), verre résistant.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives
26- Facilité de déconstruction	3	Système entièrement démontable.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les composants sont des pièces faites sur mesure selon l'architecture et la trame du bâtiment mais sont simple de fabrication.
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.

Critères	Notes	Observations
33- Coût de l'installation	2	La mise en place sur chantier est aussi aisée que la pose d'un panneau normale. De plus les panneaux sont préfabriqués.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	1	L'intégration risque de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	3	Puisque la production de chaleur par le système solaire devrait être relativement importante, la durée annuelle de fonctionnement de l'appoint devrait être minimale. C'est pourquoi l'impact environnemental de l'exploitation devrait être infime.
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la grande facilité de démontage des panneaux, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsage » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	2	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	2	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par des panneaux en bois ou vitré, ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les panneaux laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Figure B-2-4 : Notation n_{ck} de la façade panneau.

B.2.5 Façade rideau

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration de la façade rideau [Figure B-2-5].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Nous utiliserons ici des matériaux performants afin d'optimiser le rendement sachant que celui-ci ne sera pas optimum dû la position verticale du capteur.
2- Faisabilité technique	3	Réalisation simple par assemblage.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Elément préfabriqué.
4- Facilité d'installation	2	Eléments à visser et à « clipser » sur place.
5- Optimisation du positionnement	2	Capteurs verticaux – donc le rendement n'est pas optimum.
6- Adéquation en terme d'espace	3	Surface adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'eau chaude sanitaire.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	2	Remplacement d'un panneau de façade par démontage du panneau existant puisque ceux-ci sont assemblés sur l'ossature secondaire.

Critères	Notes	Observations
9- Adéquation en terme de poids	2	L'ajout du capteur risque de créer une petite surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphie ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours.
11-Modulation	3	Taille des panneaux ajustable en fonction des besoins : hauteur ou largeur au grès de l'envie de l'architecte afin qu'ils puissent composer la façade selon la trame qu'il a envie.
12- Performance thermique	2	Rendement satisfaisant grâce au choix de matériaux performants. Mais l'inclinaison n'est pas adaptée pour un rendement optimal.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé devra être à circulation forcée, avec une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de contrôler le système.
14- Optimisation de la configuration	1	Il sera possible de placer des stores devant les capteurs pour limiter la stagnation.
15- Limitation des pertes	3	Limitation des pertes assurées par l'isolation par laine de roche.
16- Fonction acoustique	2	Etude préalable à établir pour les parois légères. La laine de roche sert d'isolant acoustique.
17- Fonction isolation thermique	3	Isolation assurée par un isolant spécialement dimensionné pour assurer cette fonction pour le bâtiment mais aussi pour le capteur afin de limiter les pertes.
18- Fonction structurelle	1	N'assure pas de fonction structurelle essentielle puisqu'elle se pose sur l'ossature secondaire.
19- Sécurité d'usage	1	Le panneau peut être accessible à travers une fenêtre ou autre.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	2	Système accessible par l'intérieur.
22- Facilité d'intervention	2	Une difficulté pour le démontage.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Plaque de cuivre fragile (difficulté de mise en oeuvre), verre résistant.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.
26- Facilité de déconstruction	3	Système entièrement démontable.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les composants sont des pièces faites sur mesure selon l'architecture et la trame du bâtiment mais sont simple de fabrication
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie

Critères	Notes	Observations
33- Coût de l'installation	2	La mise en place sur chantier est aussi aisée que la pose d'une façade rideau normale. De plus les éléments sont préfabriqués.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	1	L'intégration risque de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	3	Puisque la production de chaleur par le système solaire devrait être relativement importante, la durée annuelle de fonctionnement de l'appoint devrait être minimale. C'est pourquoi l'impact environnemental de l'exploitation devrait être infime
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage de la façade rideau, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier. D'autant que cette façade est composée de plusieurs panneaux.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsable » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime
41- Convertibilité des composants	2	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	2	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par des panneaux en bois ou vitré, ce qui fait que leur emplacement est convertible
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les panneaux laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux

Figure B-2-5 : Notation n_{ck} de la façade rideau.

B.2.6 Façade à vitrage parclosé

Ci-dessous les notes n_{ck} attribuées à chaque critère pour les propositions d'intégration de la façade à vitrage parclosé [Figure B-2-6].

Critères	Notes	Observations
1- Performance des matériaux	2	Les matériaux utilisés sont ceux d'un capteur traditionnel. Ils sont aujourd'hui désignés comme performants et permettent d'avoir un bon rendement.
2- Faisabilité technique	3	La fabrication des modules est relativement simple, dans la mesure où elle est réalisée par assemblage.
3- Possibilité d'industrialisation	3	Les modules sont fabriqués par simple assemblage de composants standard, ce qui laisse penser qu'ils pourront être industrialisables.
4- Facilité d'installation	2	Dans la mesure où il suffit de visser et clipser les différents composants, l'installation est relativement simple.
5- Optimisation du positionnement	2	Les capteurs sont destinés à être installés verticalement, en façade de bâtiment, une position non optimale au rendement thermique du capteur.

Critères	Notes	Observations
6- Adéquation en terme d'espace	3	La surface pourra être adaptée en fonction des besoins. Possibilité d'ajouter des panneaux selon disponibilité surfacique.
7- Adéquation en terme d'usage	3	Les capteurs plans vitrés sont tout à fait adaptés à la production d'ECS, au plancher chauffant, ou au rafraîchissement solaire par dessiccation.
8- Possibilité d'installation en réhabilitation	2	Par remplacement d'un panneau de façade par démontage du panneau existant puisque ceux-ci sont assemblés sur l'ossature secondaire.
9- Adéquation en terme de poids	1	L'ajout du capteur risque de créer une surcharge par rapport à l'élément d'origine.
10-Visibilité	2	Intégration esthétique en façade avec un vitrage pouvant être légèrement sérigraphie ou gravés s'appuyant sur la trame des éléments alentours, mais élimination de la transparence de l'élément d'origine
11-Modulation	3	Il est possible de modifier la taille des modules solaires, les types de vitrage, ainsi que la couleur de la peinture de l'absorbeur, en fonction des besoins ou l'envie des architectes afin qu'ils puissent composer la façade selon la trame de la menuiserie.
12- Performance thermique	2	La présence des vitrages et des isolants, et l'utilisation de couleurs sombres laissent penser que la performance thermique devra être satisfaisante.
13- Possibilité d'agir sur l'installation	2	Le système solaire installé sera munie d'une régulation qui laissera aux utilisateurs la possibilité de le contrôler.
14- Optimisation de la configuration	0	Les modules solaires sont fixes, la surface de captage ne peut pas suivre la course du soleil.
15- Limitation des pertes	3	Les pertes sont limitées, côté intérieure, par une couche d'isolant thermique, et côté extérieur par le vitrage et une lame d'air.
16- Fonction acoustique	1	Le capteur, en protégeant l'intérieur du bâtiment des conditions climatiques extérieures, permet en outre d'isoler acoustiquement le bâtiment des bruits extérieurs.
17- Fonction isolation thermique	2	Isolation assurée par un isolant dimensionné pour minimiser les pertes pour le capteur et pour l'isolement thermique du bâtiment.
18- Fonction structurelle	0	Les modules solaires sont formés essentiellement de cuivre ou d'aluminium, de vitrage et des matériaux isolants légers, ils ne peuvent donc aucunement s'intégrer dans la structure du bâtiment.
19- Sécurité d'usage	1	Risques pour la sécurité des usagers si les liaisons entre les capteurs sont accessibles par derrière, ou si les capteurs sont accessible de devant.
20- Limitation des interventions	2	L'exploitation ne devrait nécessiter que peu d'interventions, hormis toutefois quelques vidanges en cas de conditions climatiques extrêmes (risque de gel ou de surchauffe).
21- Sécurité d'intervention	1	Système accessible par l'extérieure.
22- Facilité d'intervention	2	Il est possible de vidanger le système et démonter les capots.
23- Simplicité	2	Configuration simple.
24- Résistance	2	Si le système résiste globalement aux risques engendrés par les conditions climatiques (gel, surchauffe), son vitrage extérieur peut en revanche être endommagé par quelques chocs de grêle, ou de projectile.
25- Durée de vie	3	Garantie 10 ans, 15 ans dans le cadre de la garantie de résultats solaires pour les installations collectives.

Critères	Notes	Observations
26- Facilité de déconstruction	3	Le système est entièrement démontable.
27- Séparabilité des matériaux	2	Seule les alliages et la peinture utilisée sur l'absorbeur ne sont pas séparables.
28- Disponibilité des matériaux	3	Les matériaux qui constituent le module sont encore disponibles à l'état naturel ou fabricables en quantité relativement importantes.
29- Coût des matériaux	3	Les matériaux étant disponibles, simples et communs, ils sont relativement peu chers.
30- Impact env. des matériaux	1	La fabrication du cuivre, du verre ou encore de l'aluminium font appel à des installations polluantes et très consommatrice d'énergie.
31- Coût de la fabrication	2	Les composants sont des pièces faites sur mesure selon l'architecture et la trame du bâtiment mais sont simple de fabrication.
32- Impact env. de la fabrication	3	Les capteurs sont fabriqués à partir de procédé non polluants et à faible consommation d'énergie.
33- Coût de l'installation	2	Par rapport à la solution d'origine, le surcoût provient de l'ajout de l'absorbeur, de l'isolant et du réseau hydraulique.
34- Impact env. de l'installation	3	Pose simple sans impact sur l'environnement.
35- Acceptation	2	Le système proposé offre une intégration dans le bâtiment intéressante pour les architectes et sûrement aussi pour les usagers.
36- Confort thermique	1	L'intégration risque de créer des interactions importantes avec la zone occupée du bâtiment.
37- Coût de l'exploitation	3	Dans la mesure où la production de chaleur par le système devrait être tout à fait acceptable, et dans la mesure où les interventions de maintenance devraient être limitées, le coût d'exploitation du système de chauffage en ECS devrait être relativement bas.
38- Impact env. de l'exploitation	2	L'utilisation de l'énergie solaire devrait avoir un bon impact environnemental pendant l'exploitation, surtout pour la réduction des émissions de GES, mais si de grandes superficies de captage sont installées il y aura un risque de créer des îlots de chaleur.
39- Coût de la déconstruction	3	Etant donné la facilité de démontage de la menuiserie par les capots, la déconstruction ne devrait avoir que peu d'impact financier.
40- Impact env. de la déconstruction	3	La déconstruction devrait être réalisée par « déclipsage » et dévissage des composants, c'est pourquoi son impact environnemental devrait être minime.
41- Convertibilité des composants	2	Les composants sont entièrement recyclables.
42- Convertibilité de l'emplacement	2	Les panneaux capteurs peuvent aisément remplacer par des vitrages normaux ce qui fait que leur emplacement est convertible.
43- Coût des traitements	1	Les quantités d'énergies nécessaires aux fabrications des différents matériaux constituant les capteurs laissent penser que les traitements de ces matériaux seront très consommateurs d'énergie et donc coûteux.

Figure B-2-6: Notation n_{ck} de la façade à vitrage parclosé.

Annexe C
(de la partie III)

C.1 Résultats des simulations

C.1.1 La première série de simulations

Cette première série de résultats représente la production d'un système solaire d'ECS ayant 8m² de surface de captage et un ballon de 300L de volume. Les couleurs simulées sont le RAL 3007 (rouge, a= 82,5 et e=78,8), le RAL 6007 (vert, a= 68,5 et e=79,9), et le RAL 5020 (bleu, a= 61,3 et e=71,7).

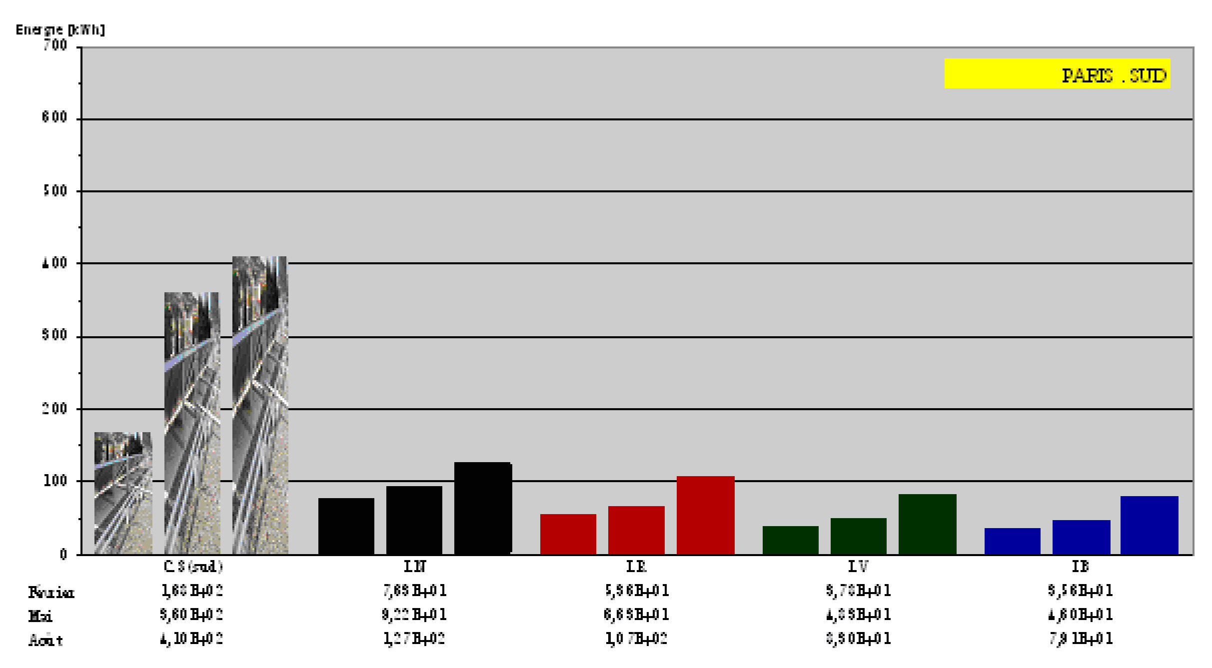


Figure C-1-1 : Quantités d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons pour une orientation Sud (az=0°).

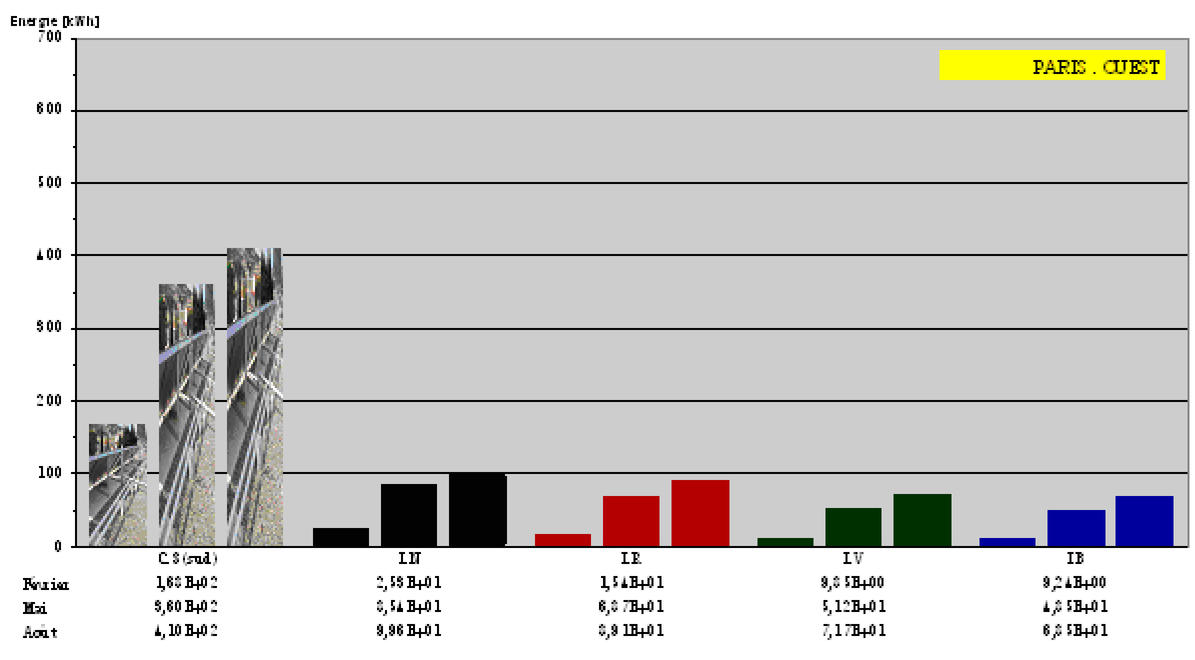


Figure C-1-2 : Quantités d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons pour une orientation Ouest (az=90°).

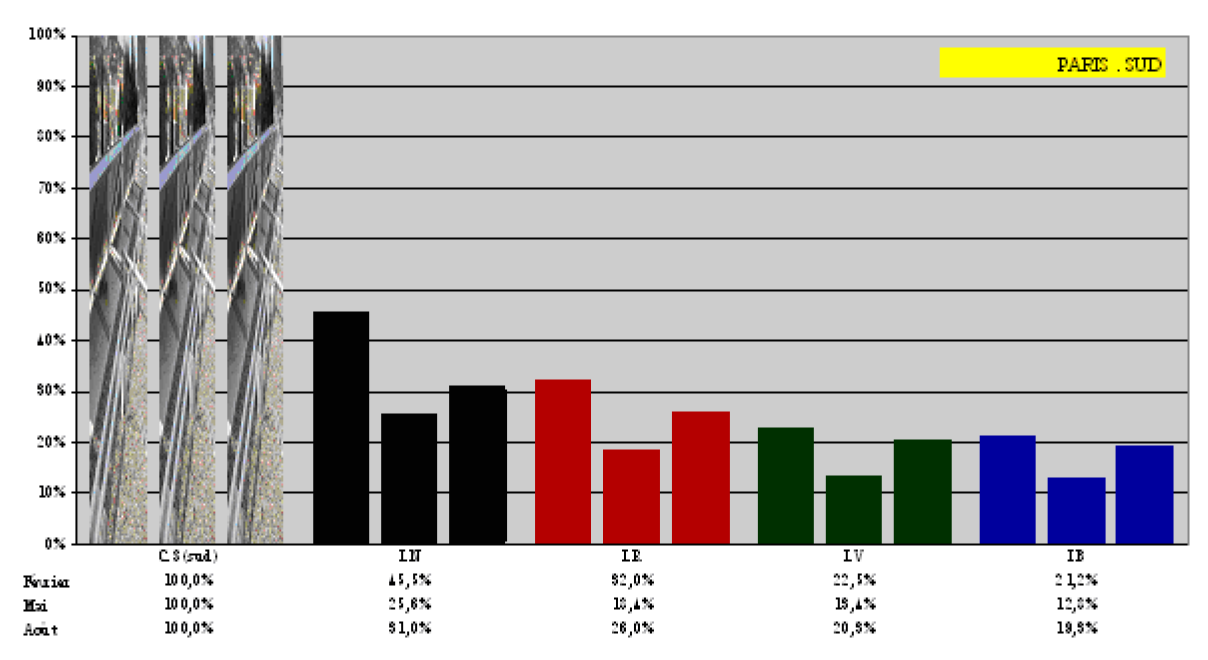


Figure C-1-3 : Pourcentage d’énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

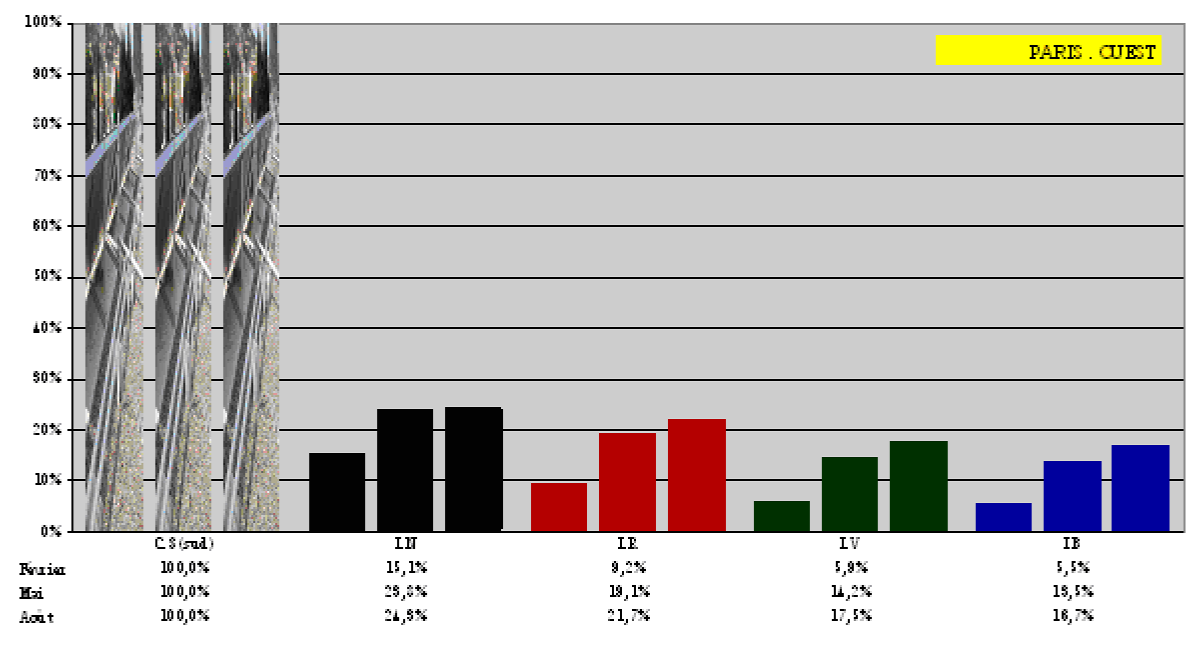


Figure C-1-4 : Pourcentage d’énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

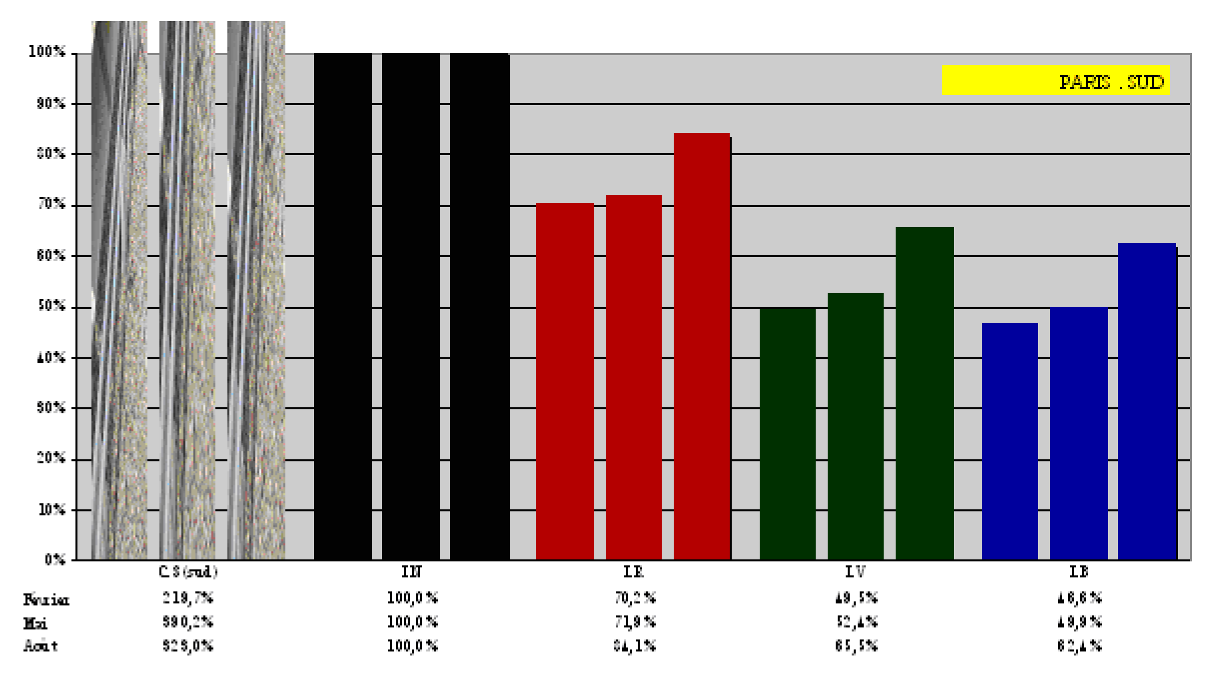


Figure C-1-5 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur noir intégré pour une orientation Sud (az=0°).

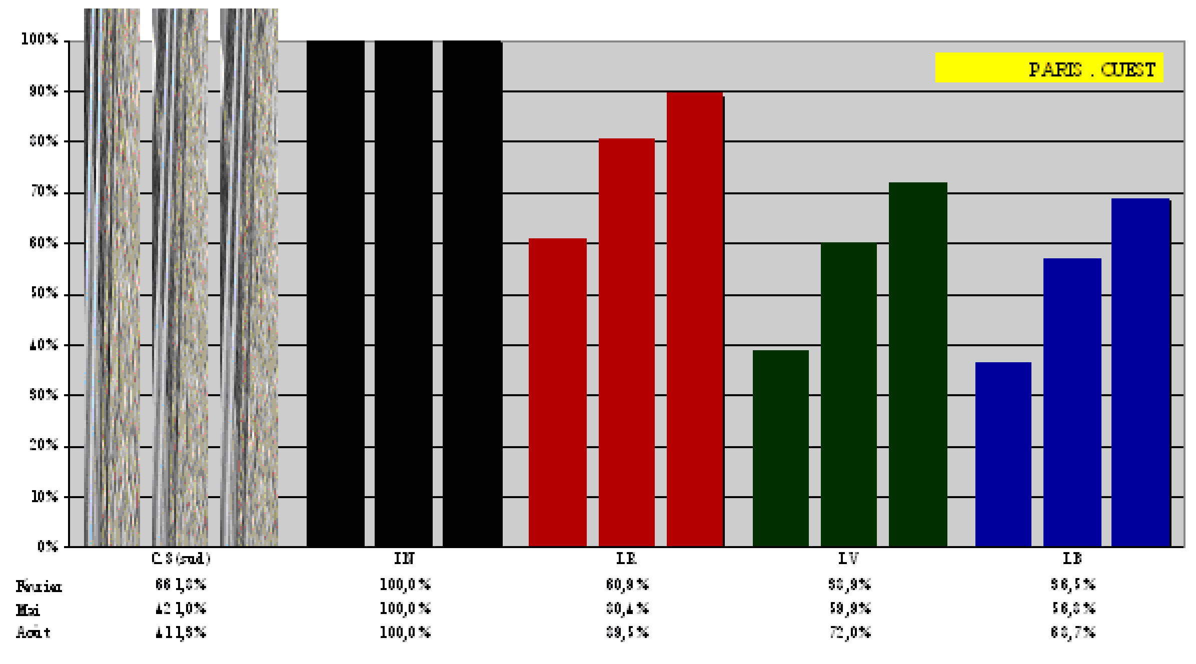


Figure C-1-6 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur noir intégré pour une orientation Ouest (az=90°).

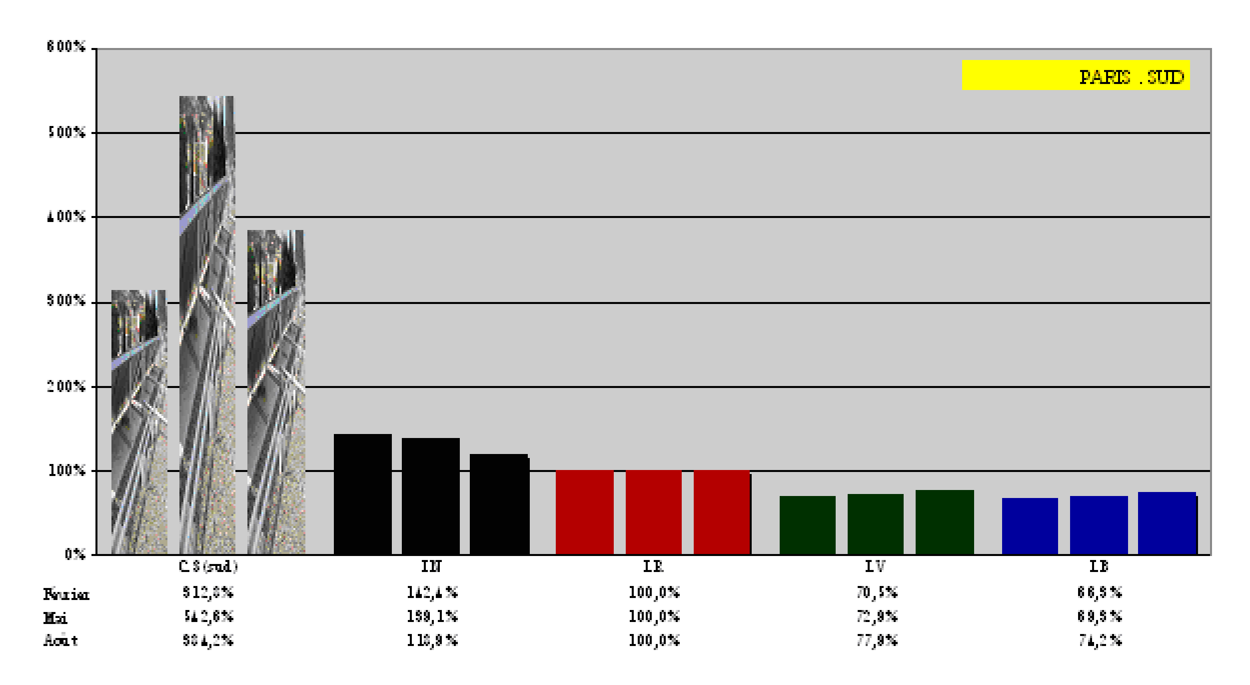


Figure C-1-7 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur rouge intégré pour une orientation Sud (az=0°).

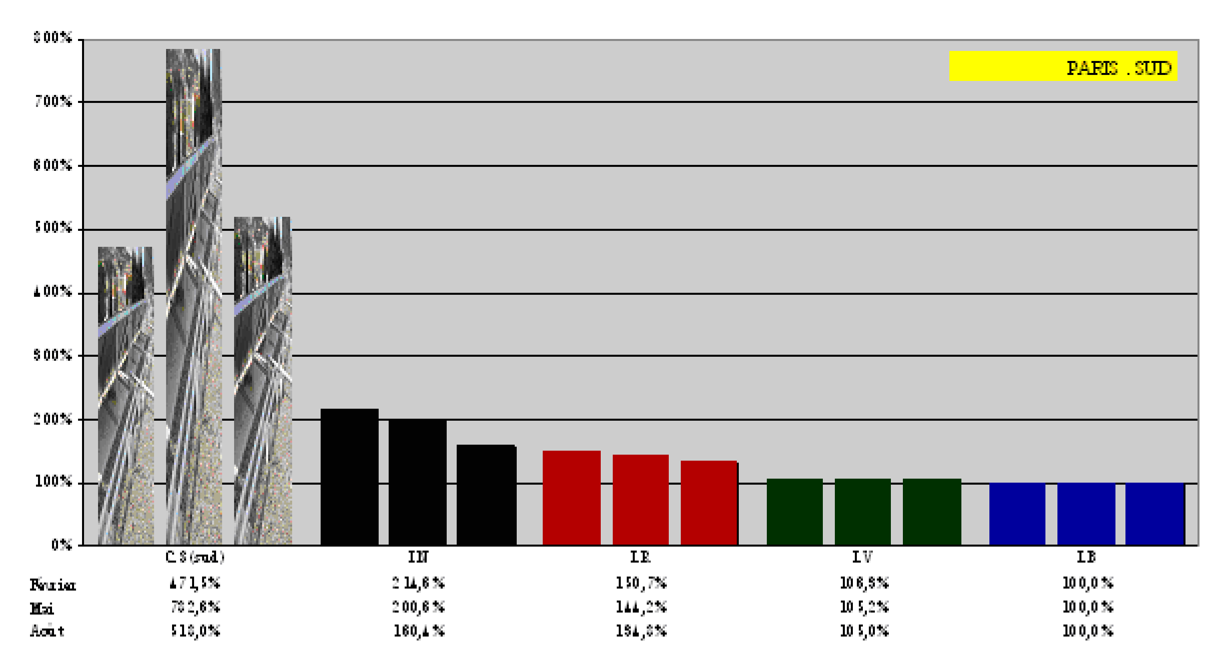


Figure C-1-8 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur vert intégré pour une orientation Sud (az=0°).

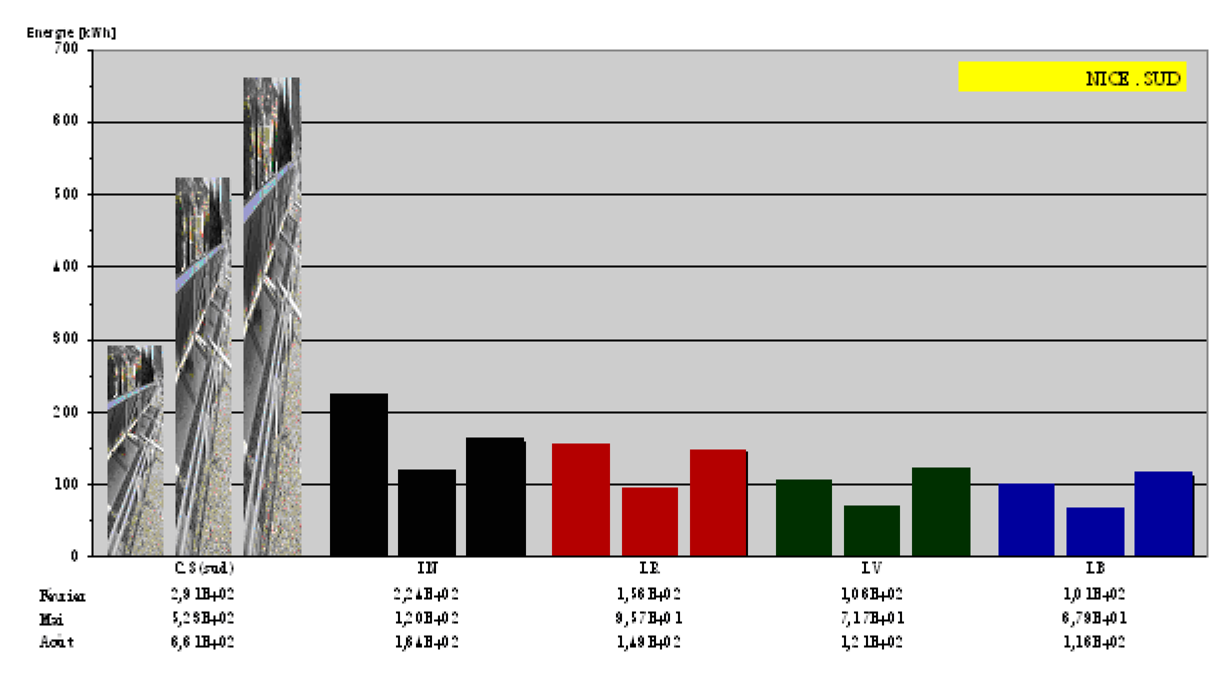


Figure C-1-9 : Quantités d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons pour une orientation Sud (az=0°).

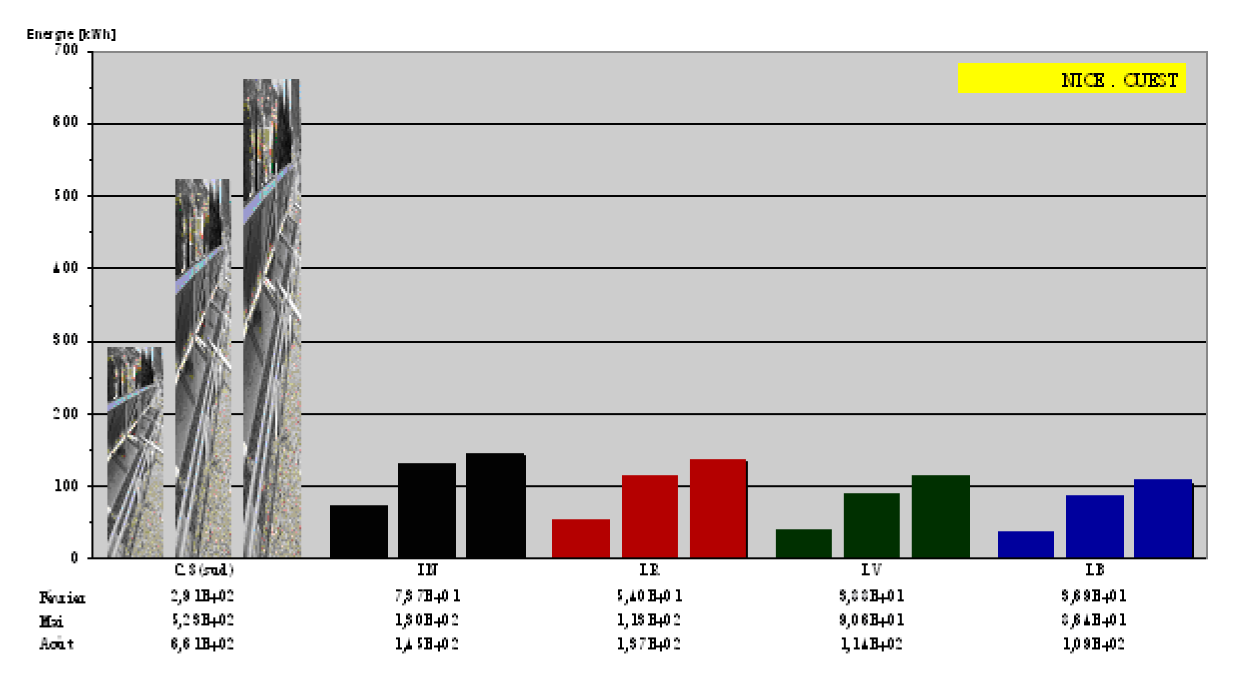


Figure C-1-10 : Quantités d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons pour une orientation Ouest (az=90°).

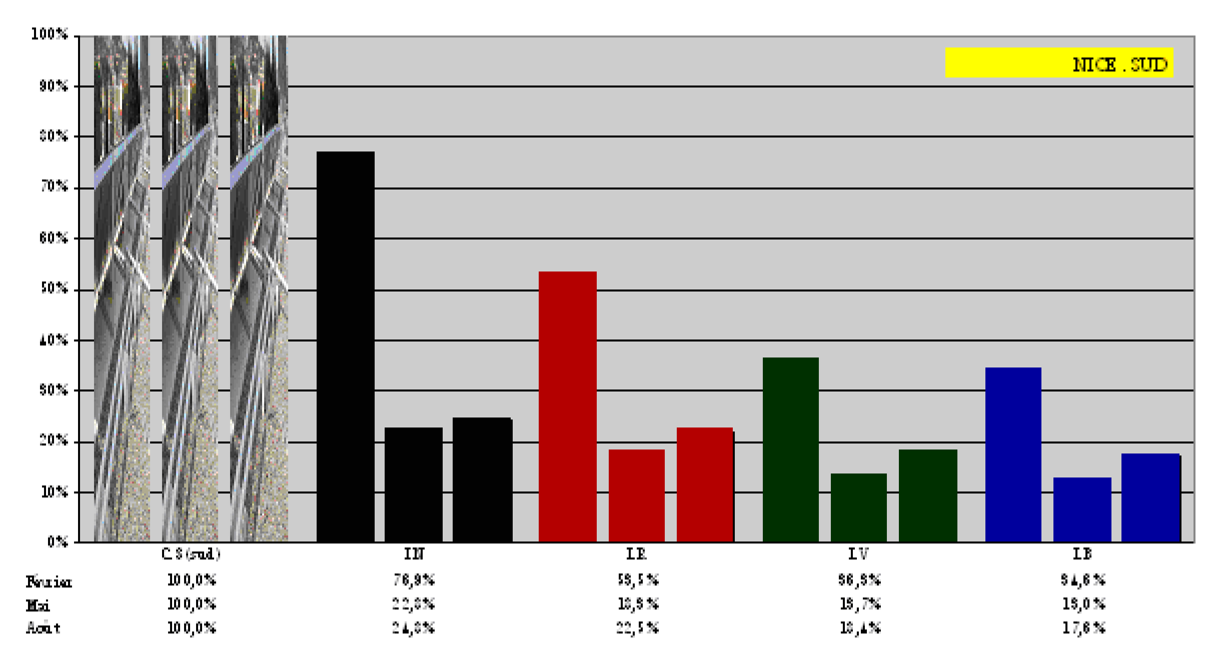


Figure C-1-11 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

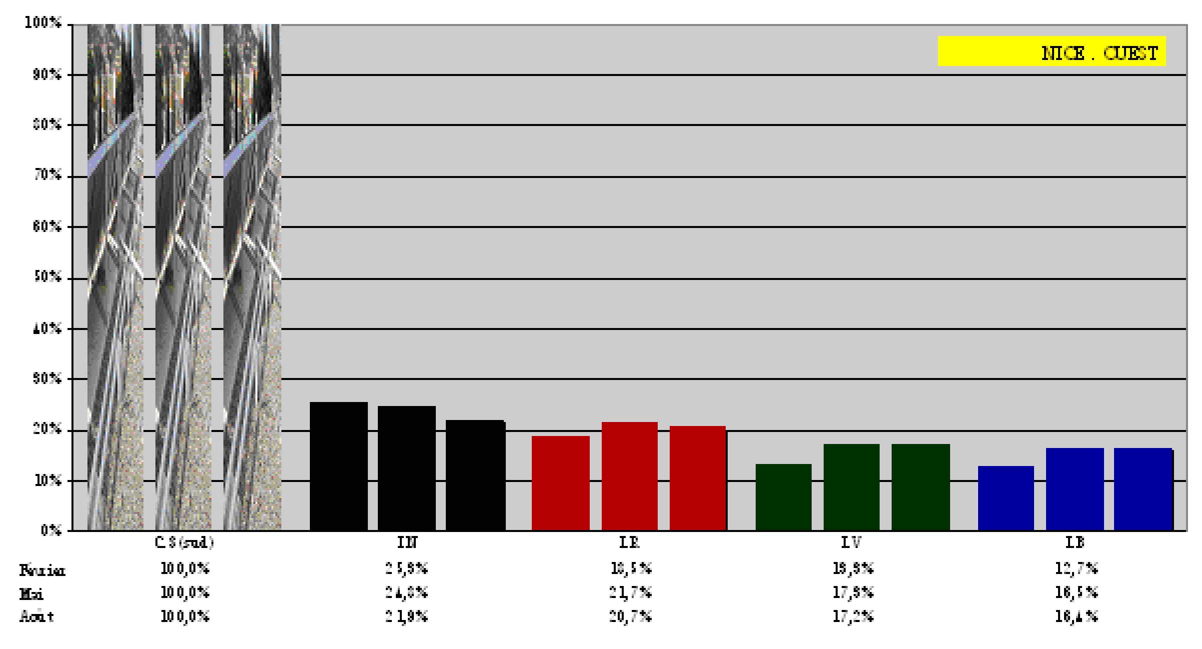


Figure C-1-12 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

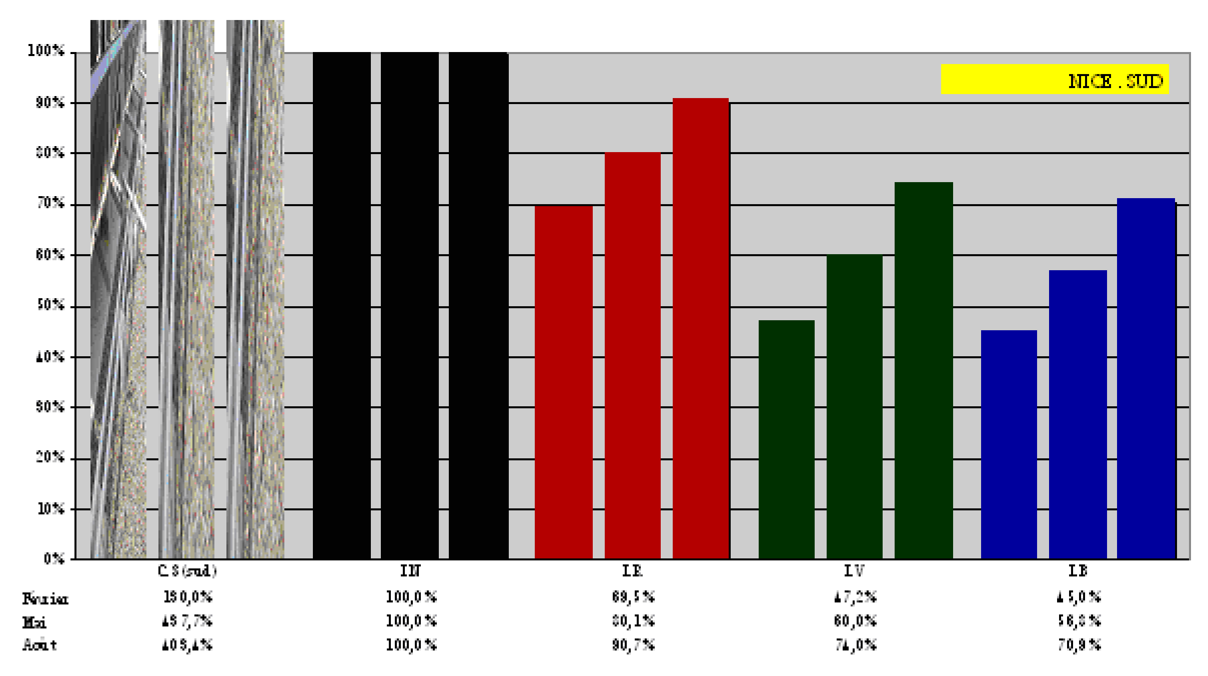


Figure C-1-13 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur noir intégré pour une orientation Sud (az=0°).

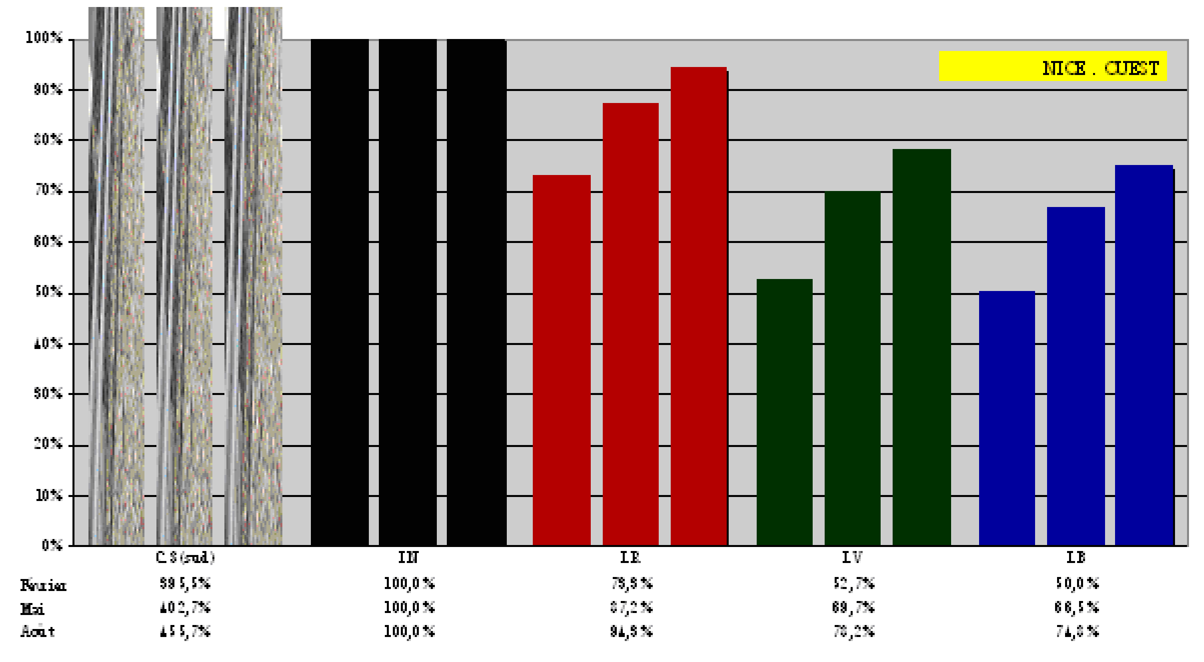


Figure C-1-14 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur noir intégré pour une orientation Ouest (az=90°).

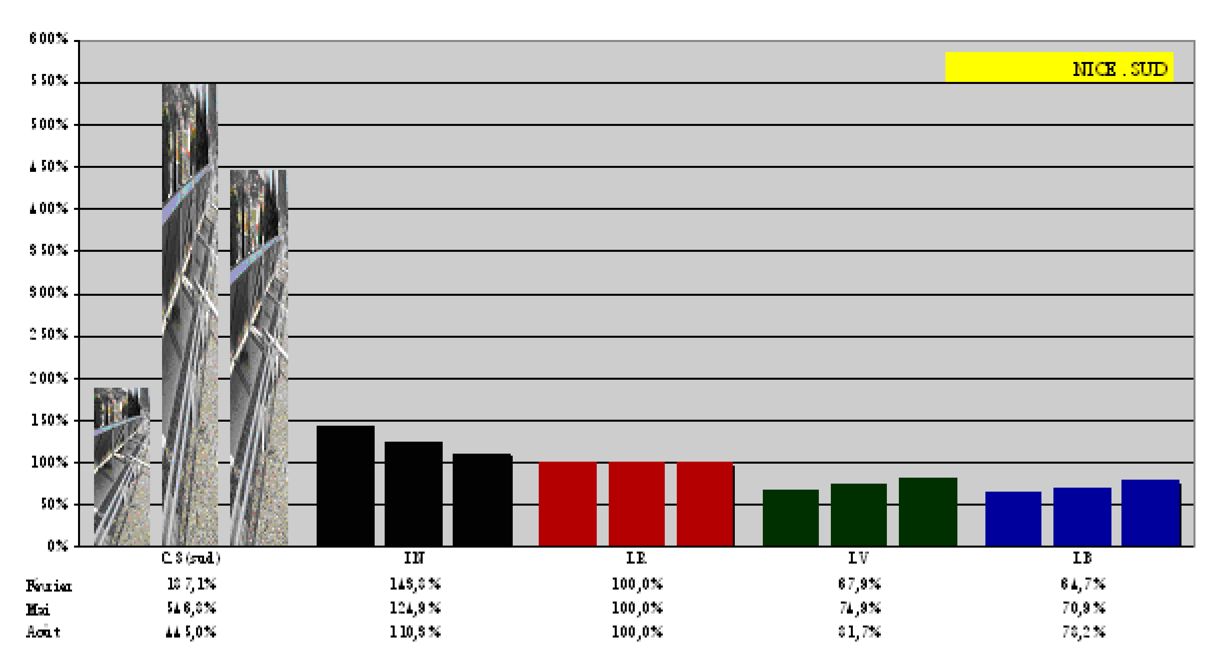


Figure C-1-15 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur rouge intégré pour une orientation Sud (az=0°).

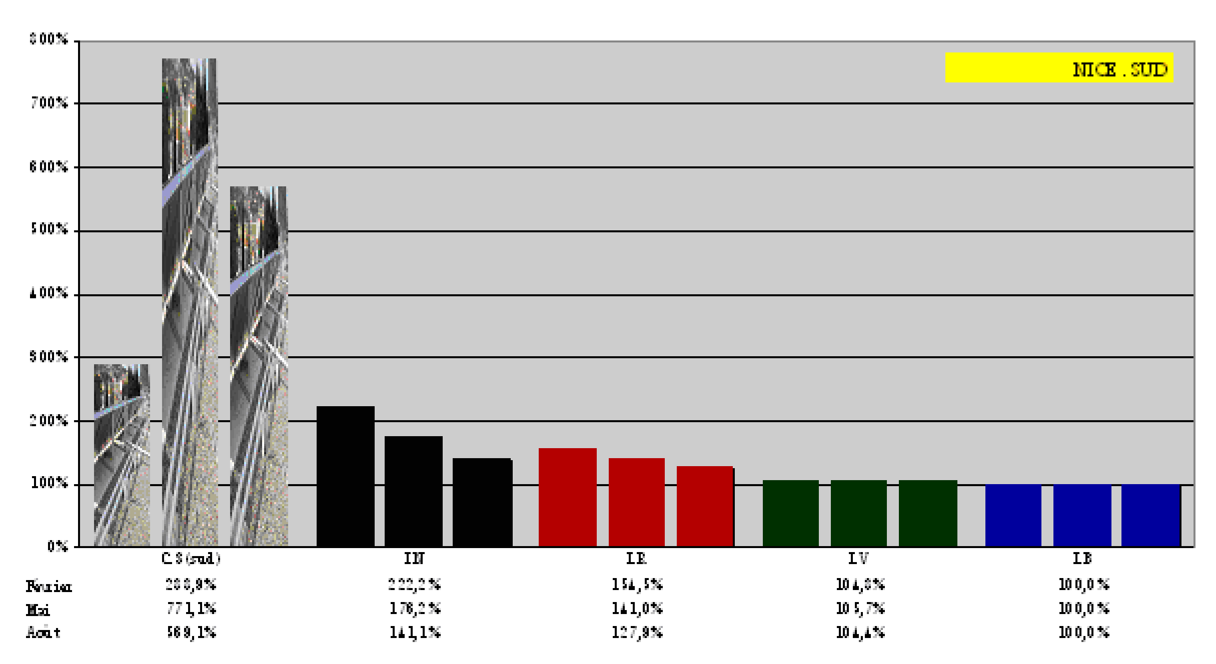


Figure C-1-16 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice dans 3 saisons par rapport à l'énergie utile d'un capteur vert intégré pour une orientation Sud (az=0°).

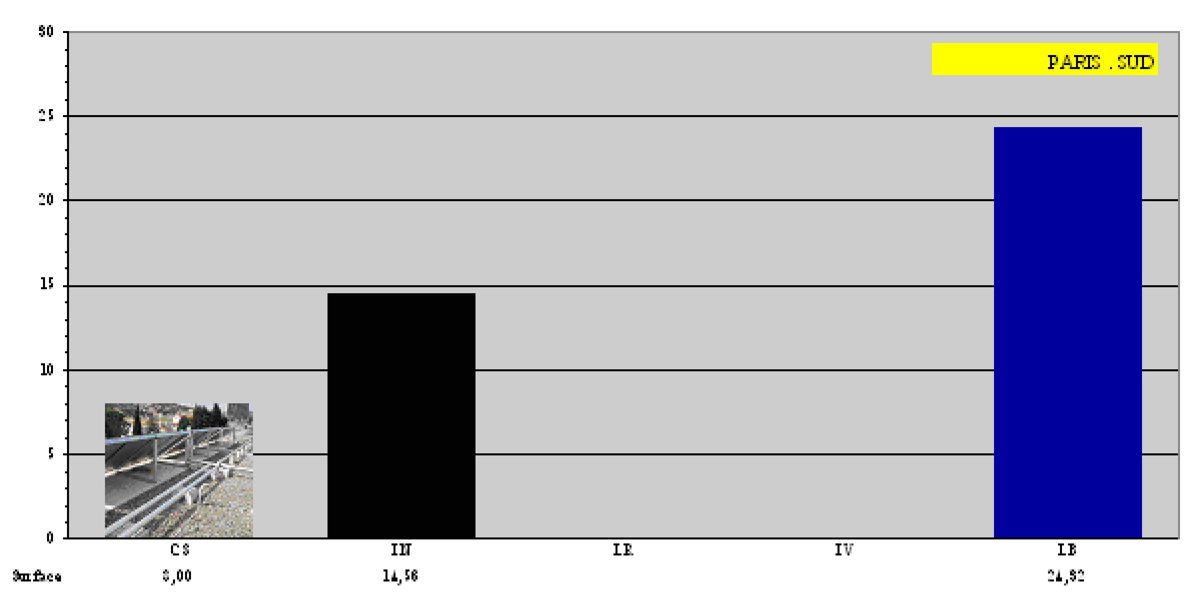


Figure C-1-17 : Surfaces nécessaires pour produire une même quantité d'énergie utile à Paris pour une orientation Sud (az=0°).

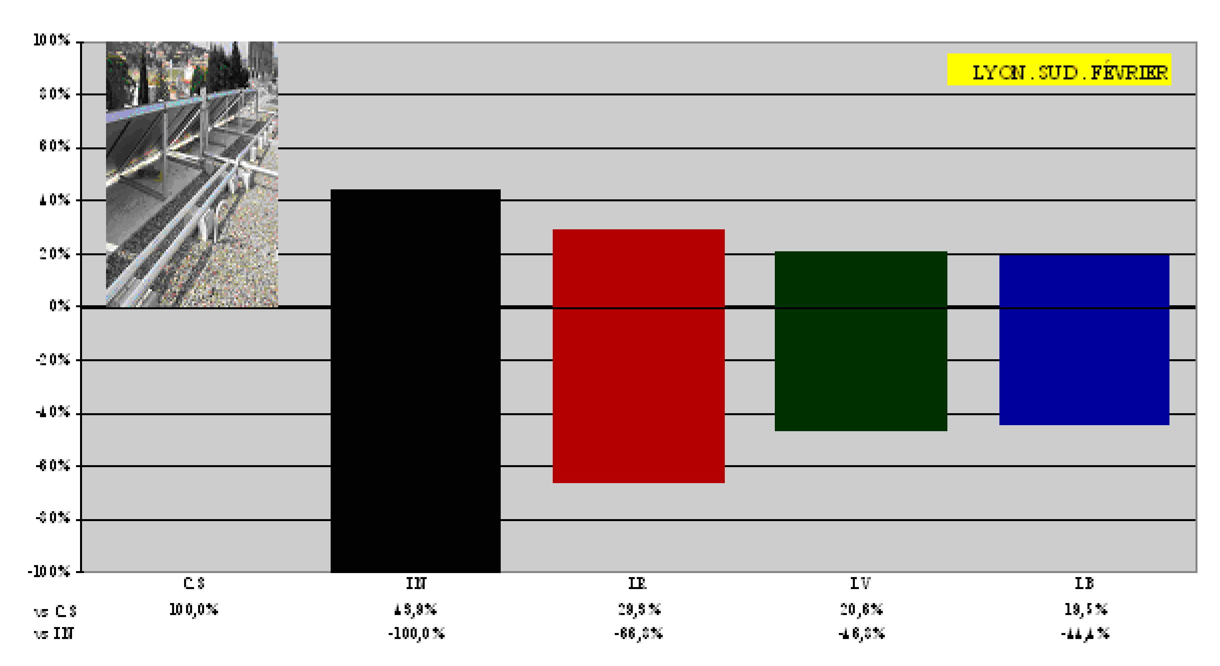


Figure C-1-18 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février à Lyon par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

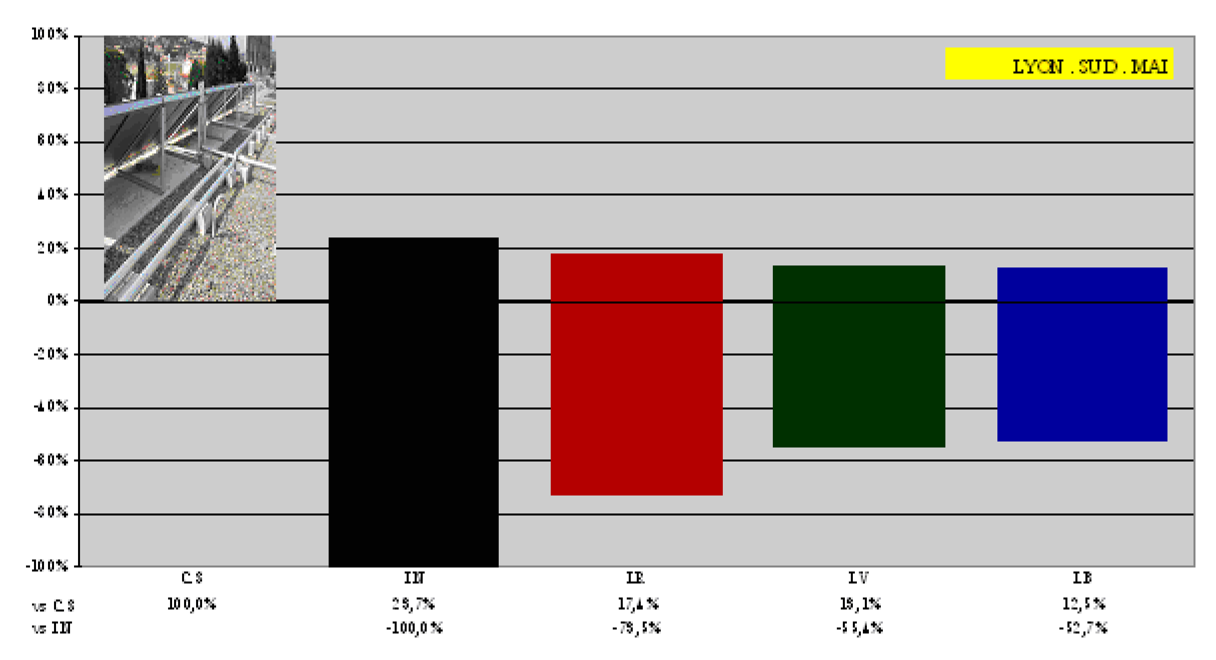


Figure C-1-19 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai à Lyon par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

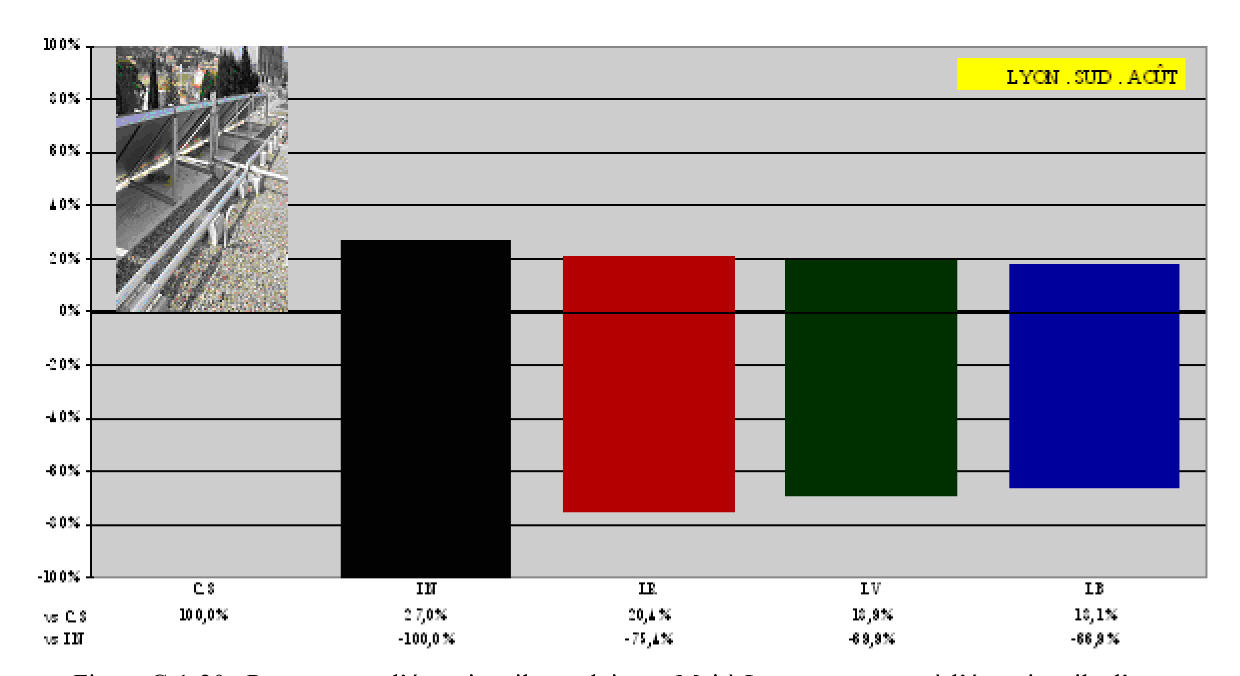


Figure C-1-20 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai à Lyon par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

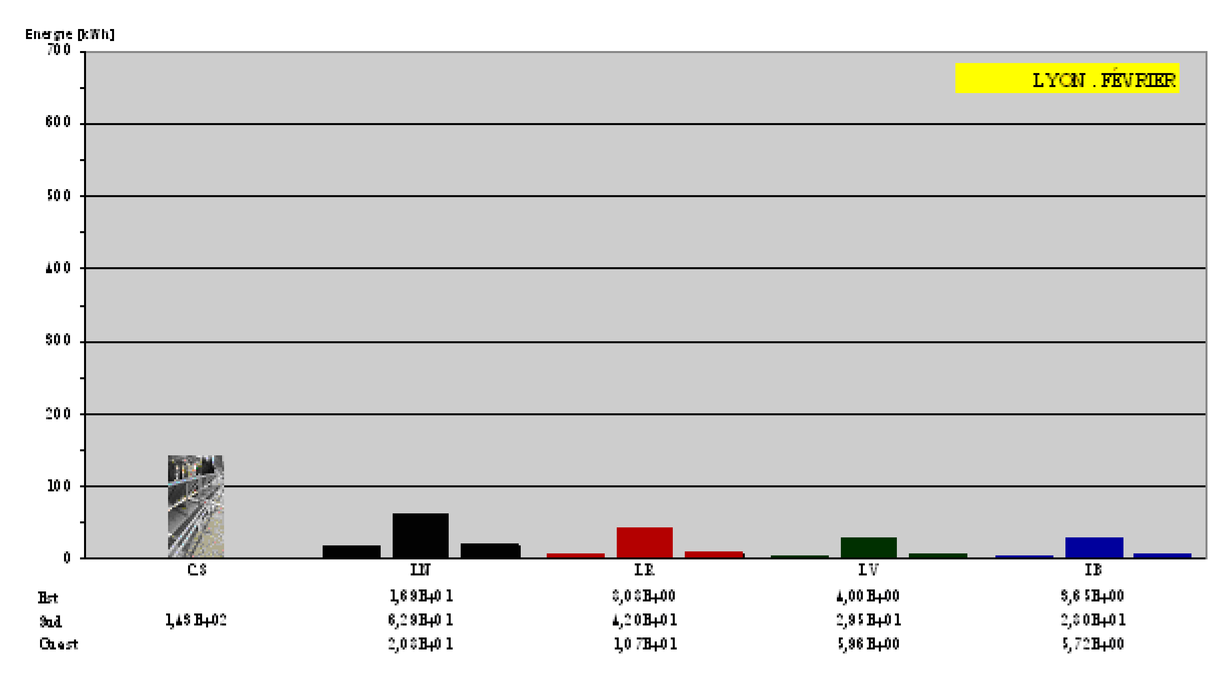


Figure C-1-21 : Quantités d’énergie utile en Février à Lyon pour trois orientations.

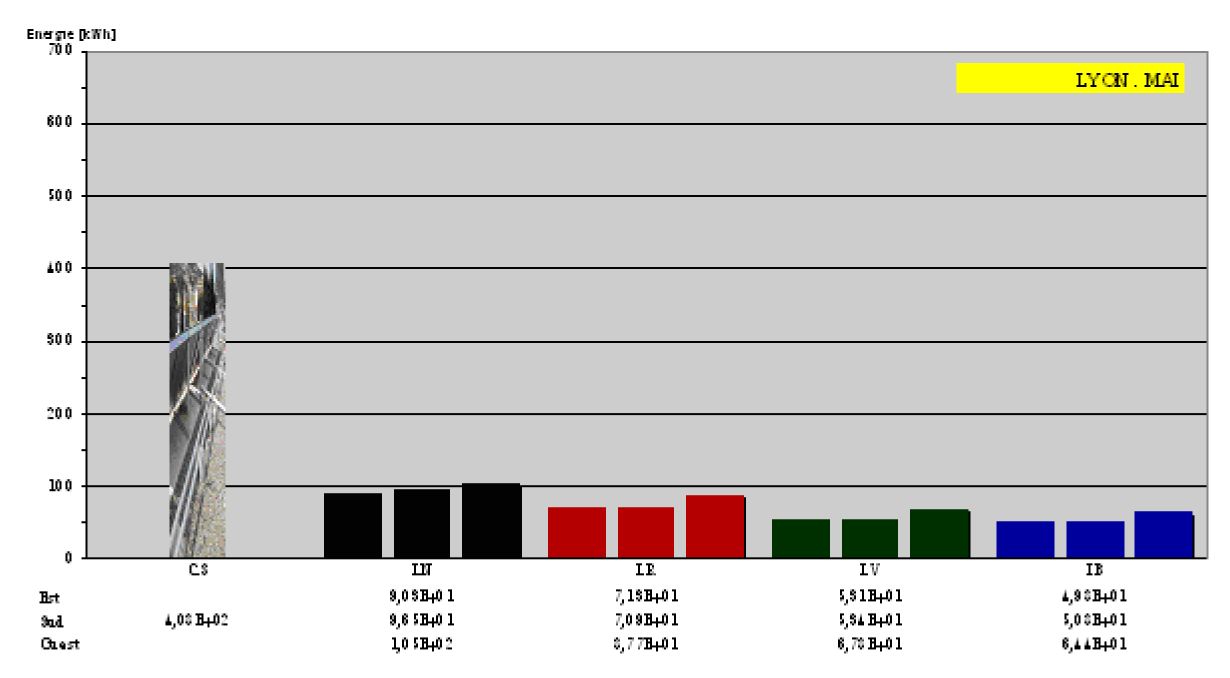


Figure C-1-22 : Quantités d’énergie utile en Mai à Lyon pour trois orientations.

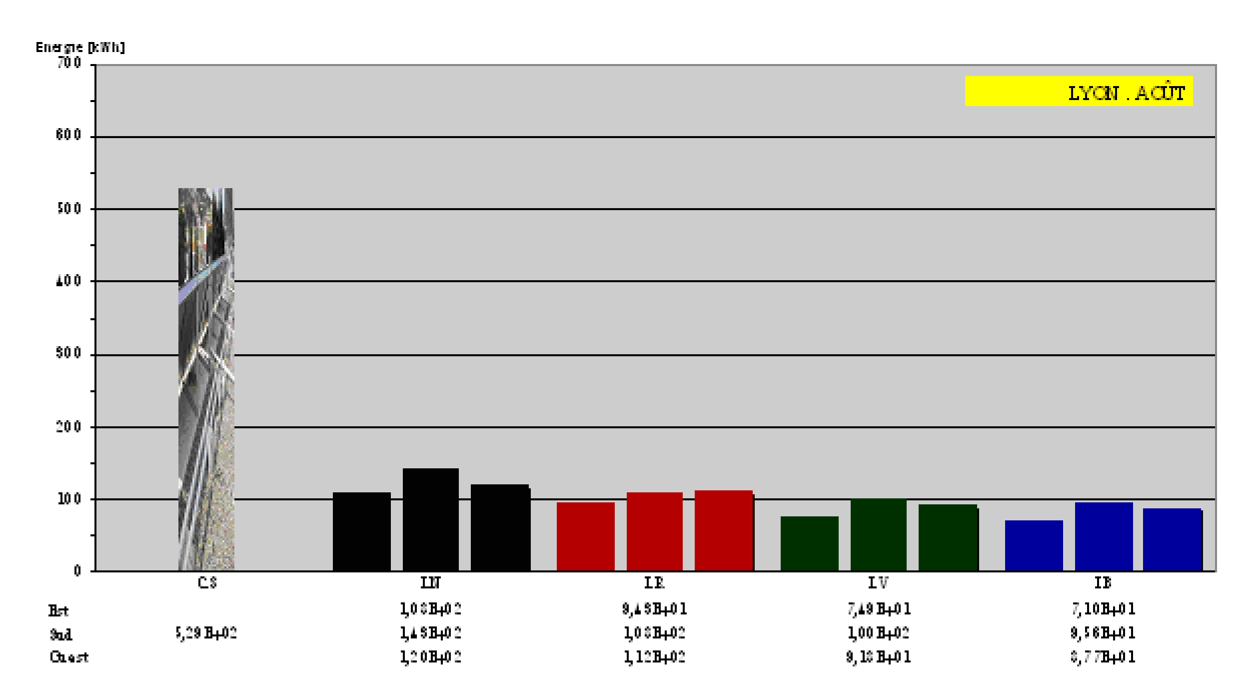


Figure C-1-23 : Quantités d'énergie utile en Août à Lyon pour trois orientations.

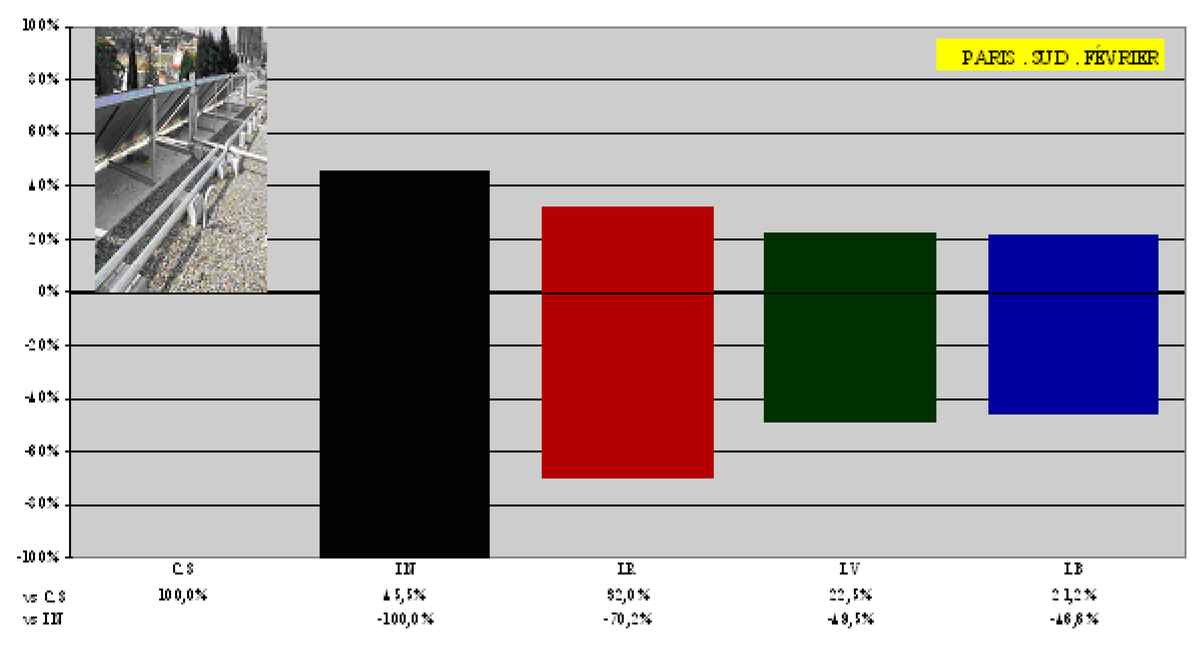


Figure C-1-24 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février à Paris par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

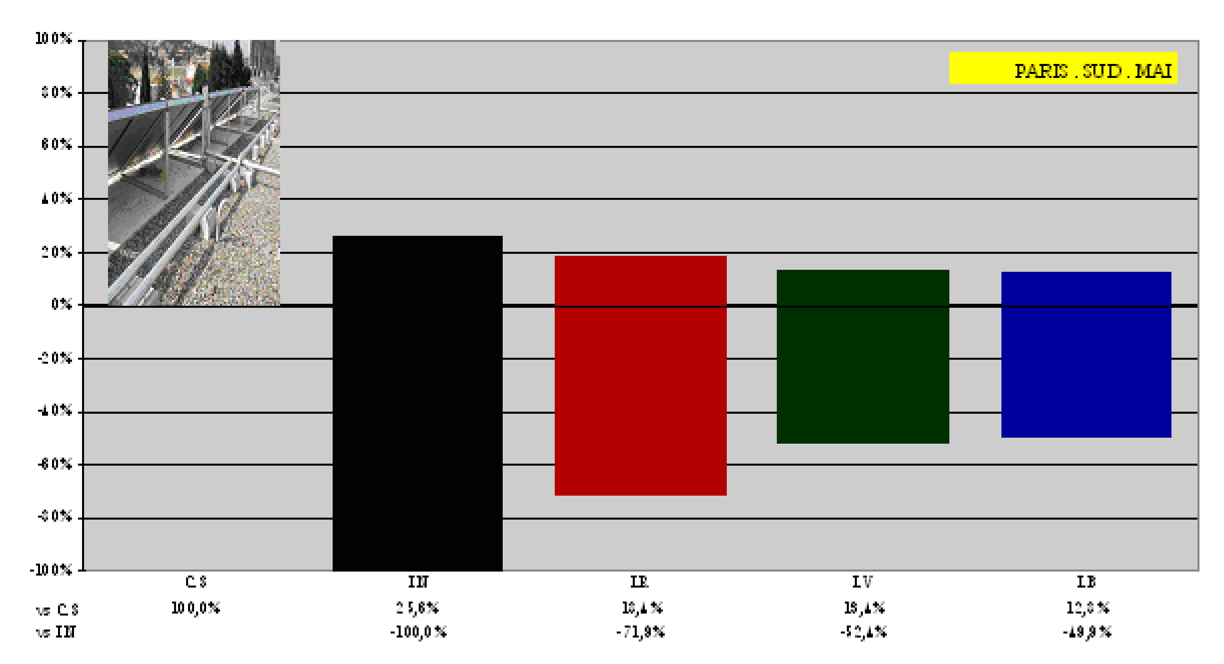


Figure C-1-25 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai à Paris par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

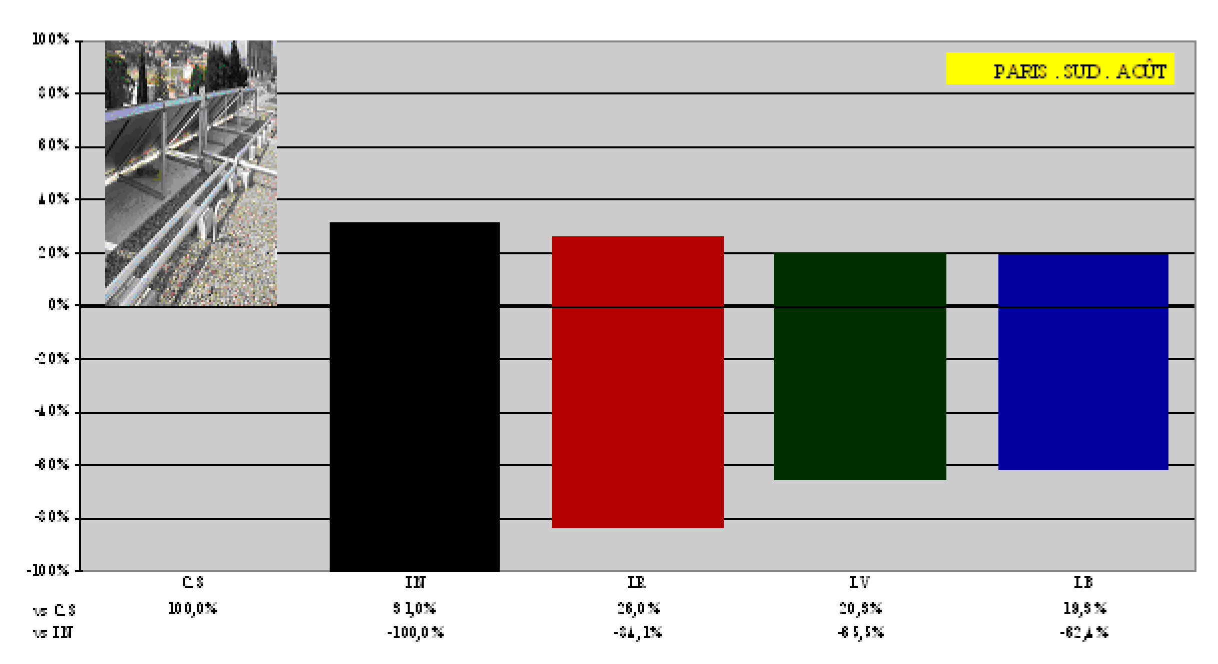


Figure C-1-26 : Pourcentage d'énergie utile produite en Août à Paris par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°)..

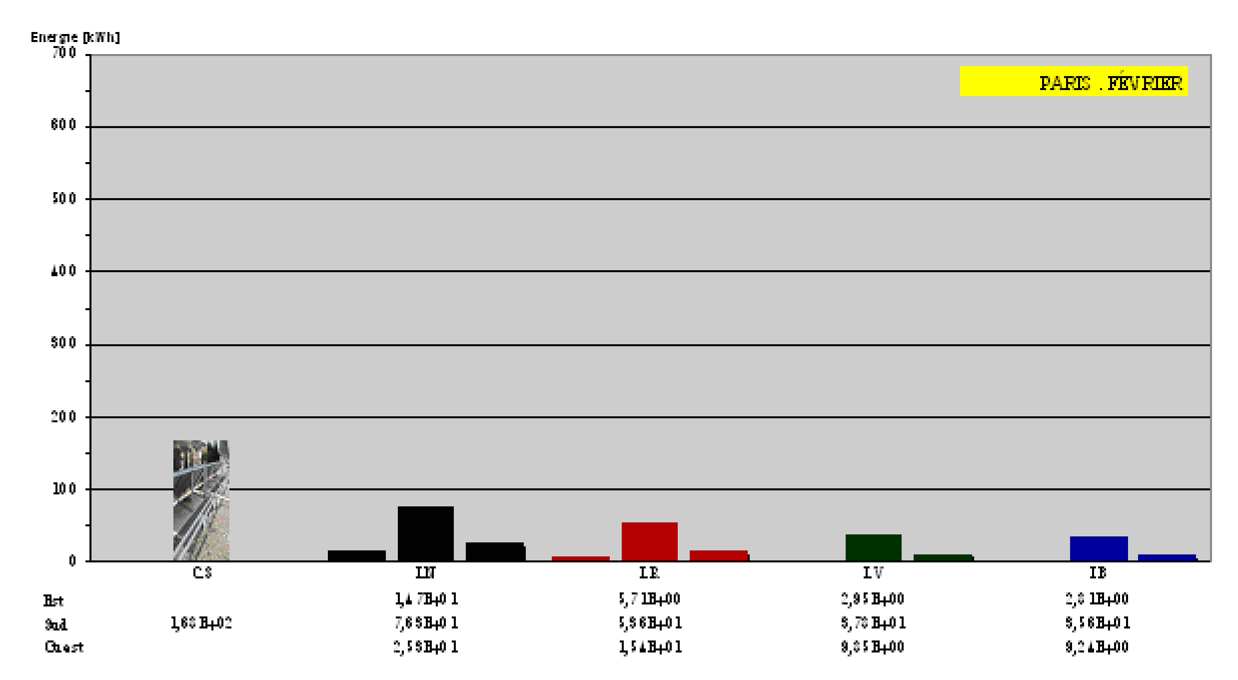


Figure C-1-27 : Quantités d'énergie utile en Février à Paris pour trois orientations.

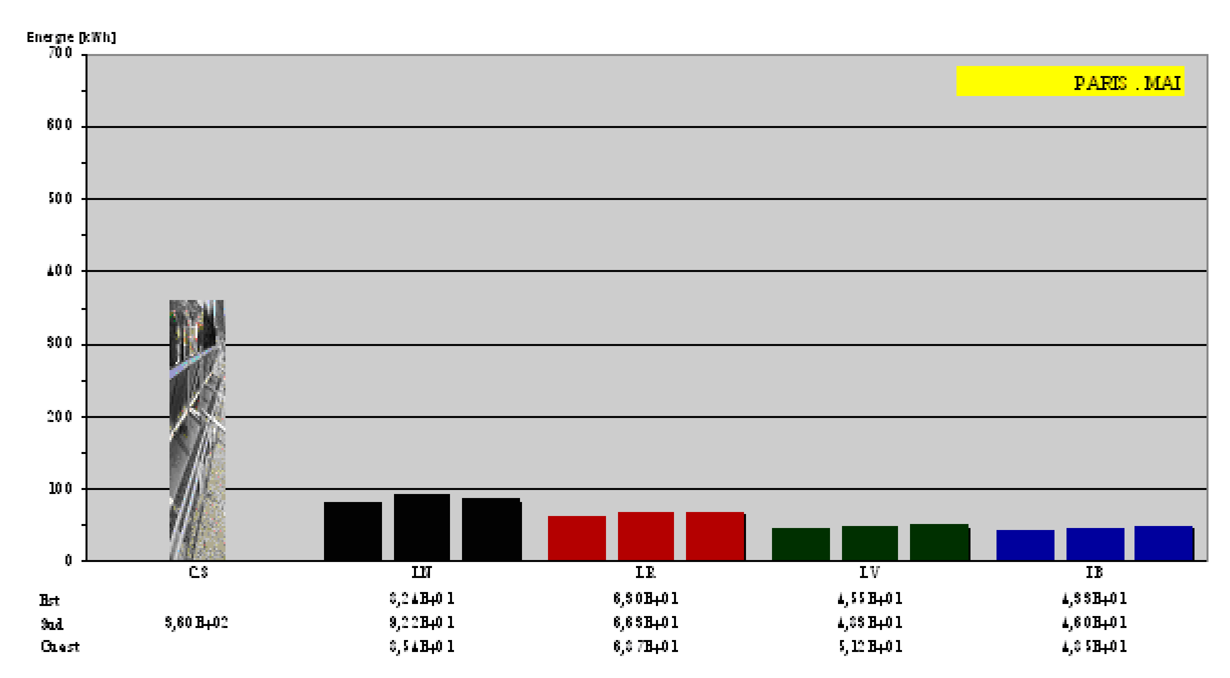


Figure C-1-28 : Quantités d'énergie utile en Mai à Paris pour trois orientations.

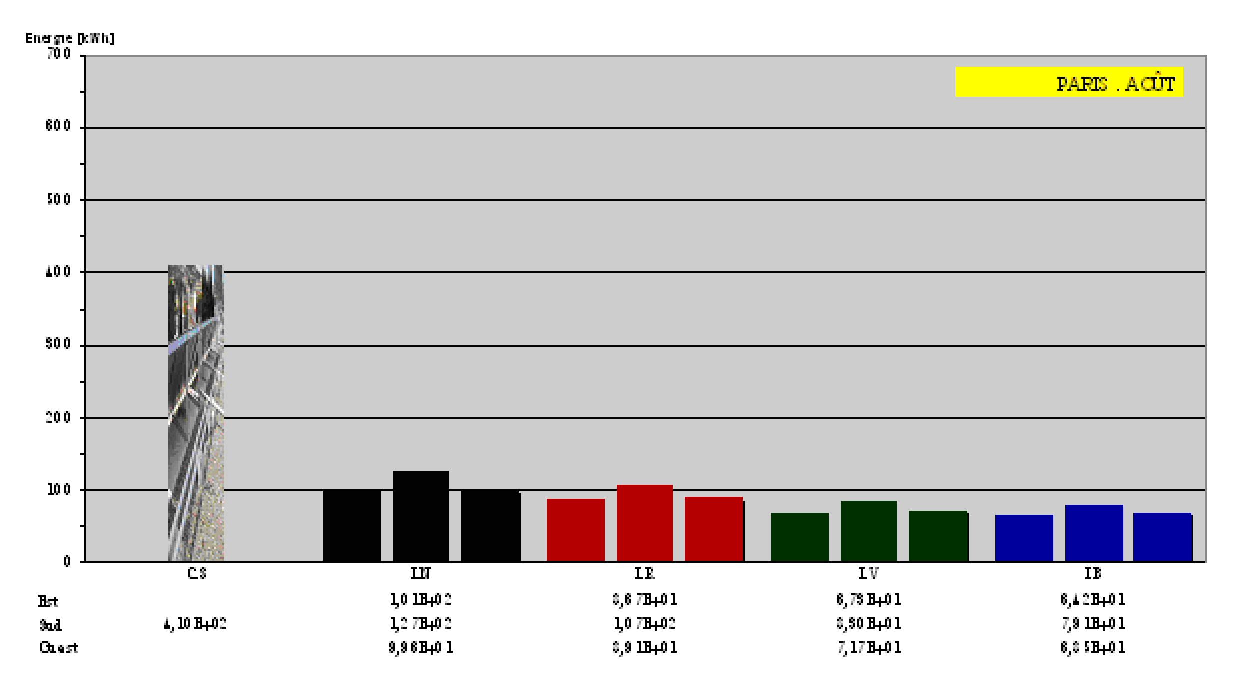


Figure C-1-29 : Quantités d'énergie utile en Août à Paris pour trois orientations.

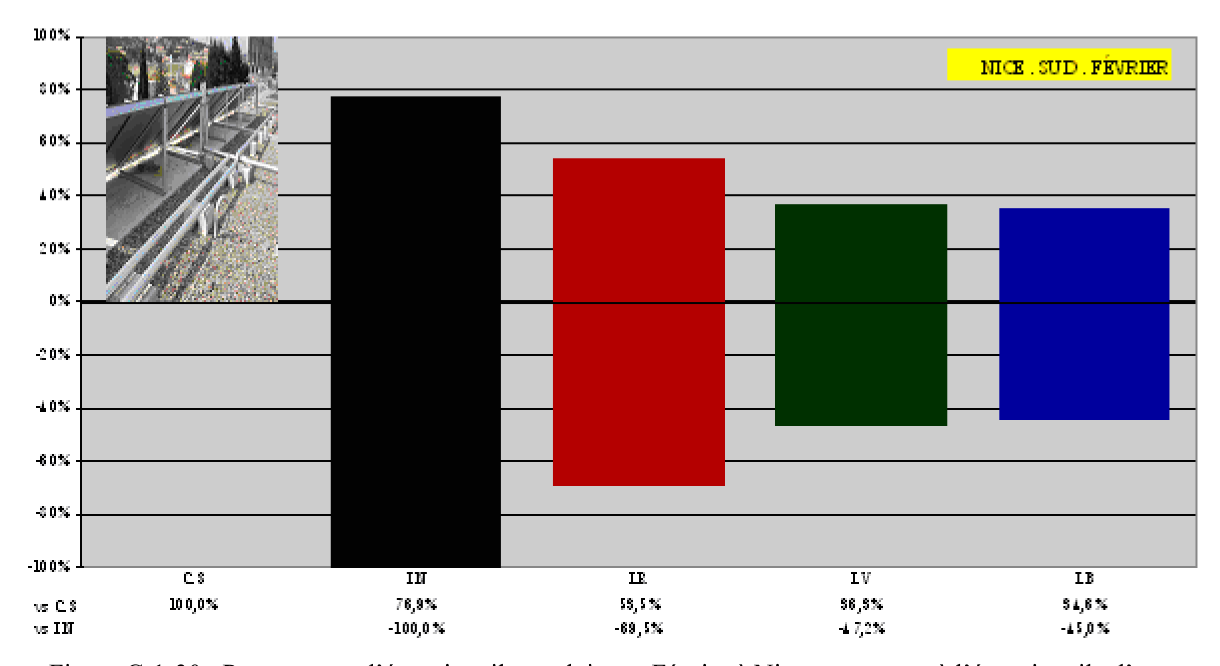


Figure C-1-30 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février à Nice par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

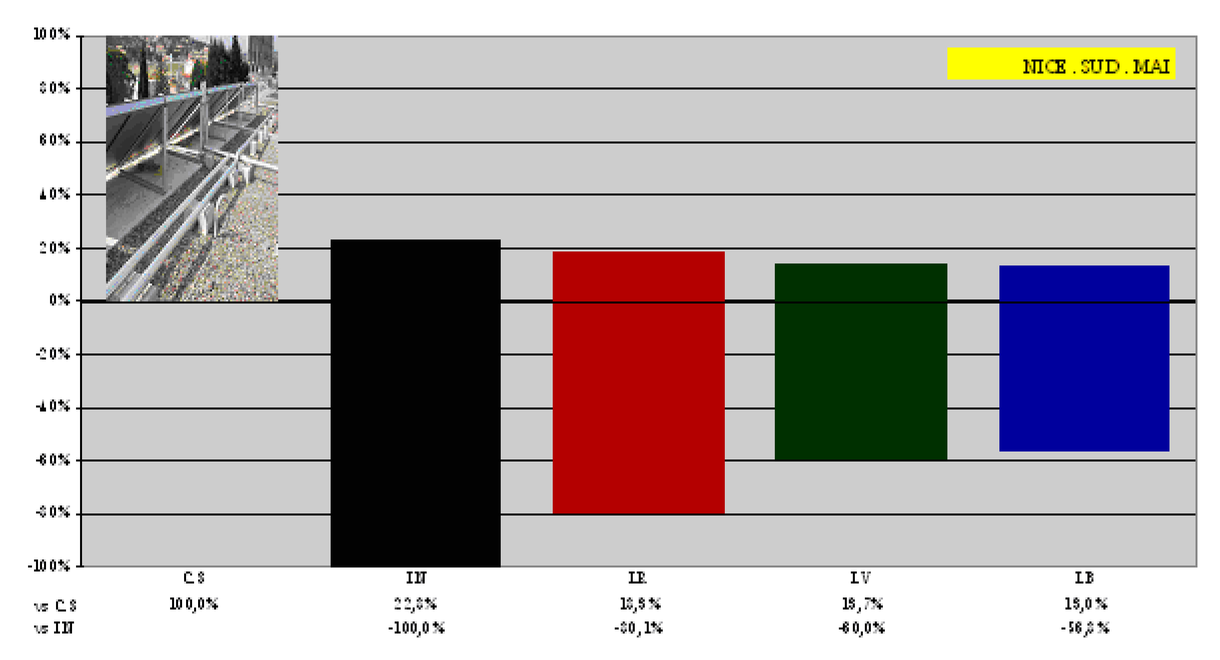


Figure C-1-31 : Pourcentage d’énergie utile produite en Mai à Nice par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

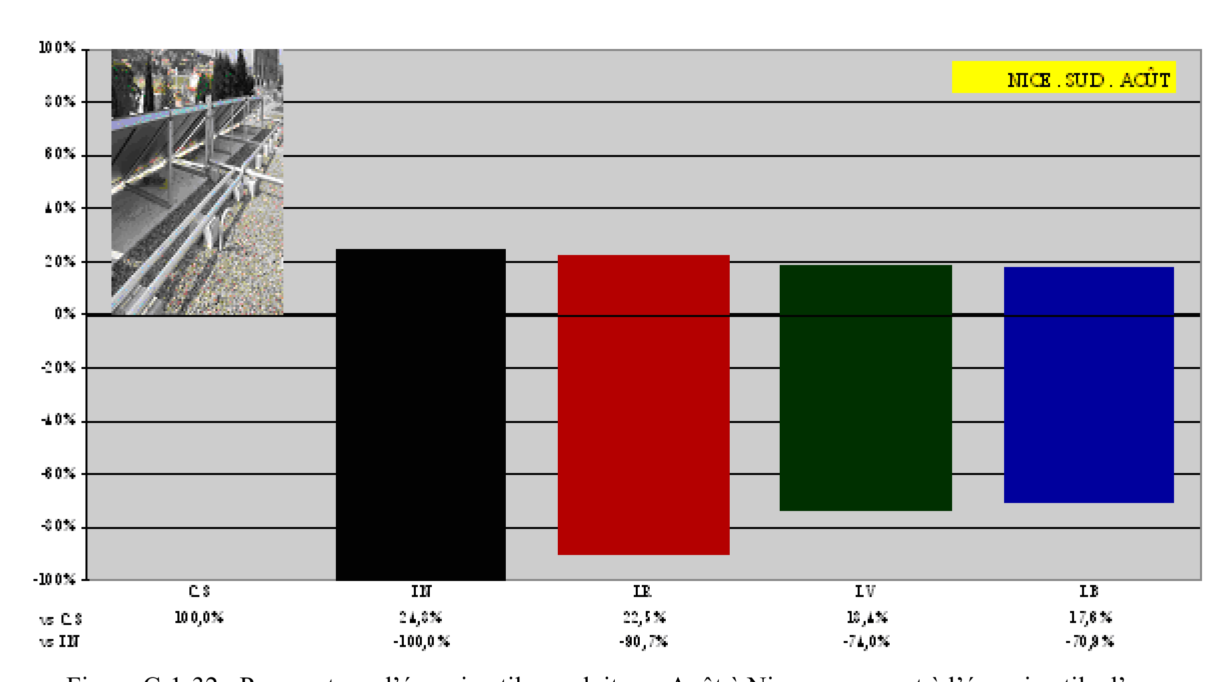


Figure C-1-32 : Pourcentage d’énergie utile produite en Août à Nice par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

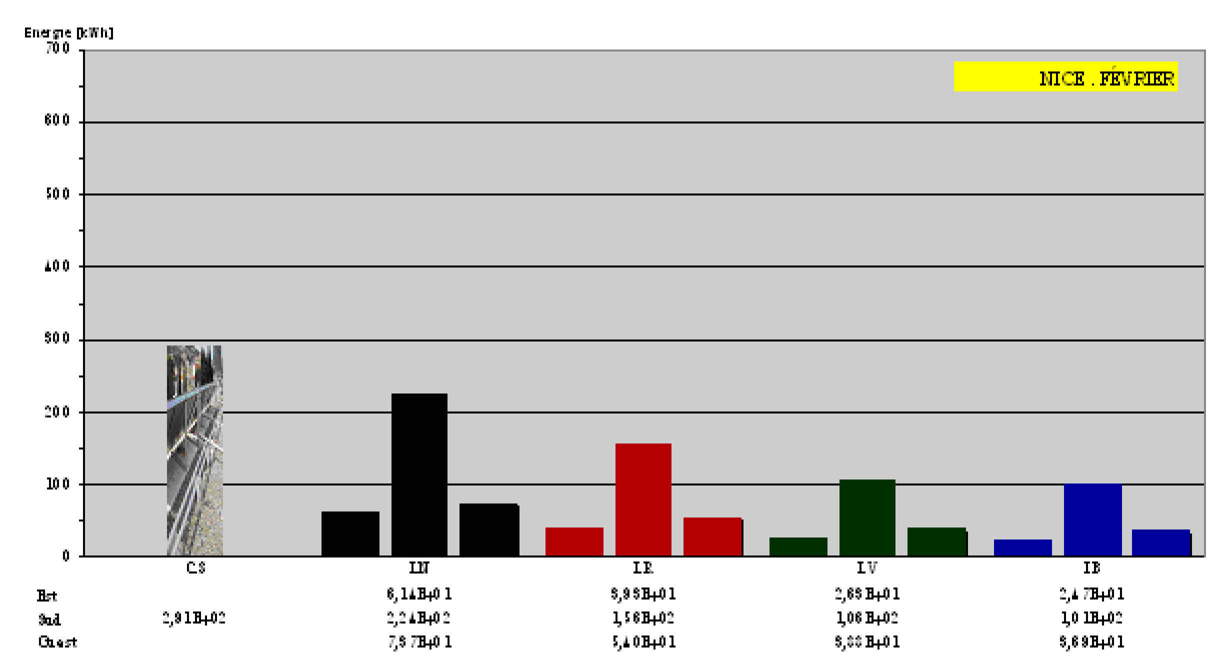


Figure C-1-33 : Quantités d'énergie utile en Février à Nice pour trois orientations.

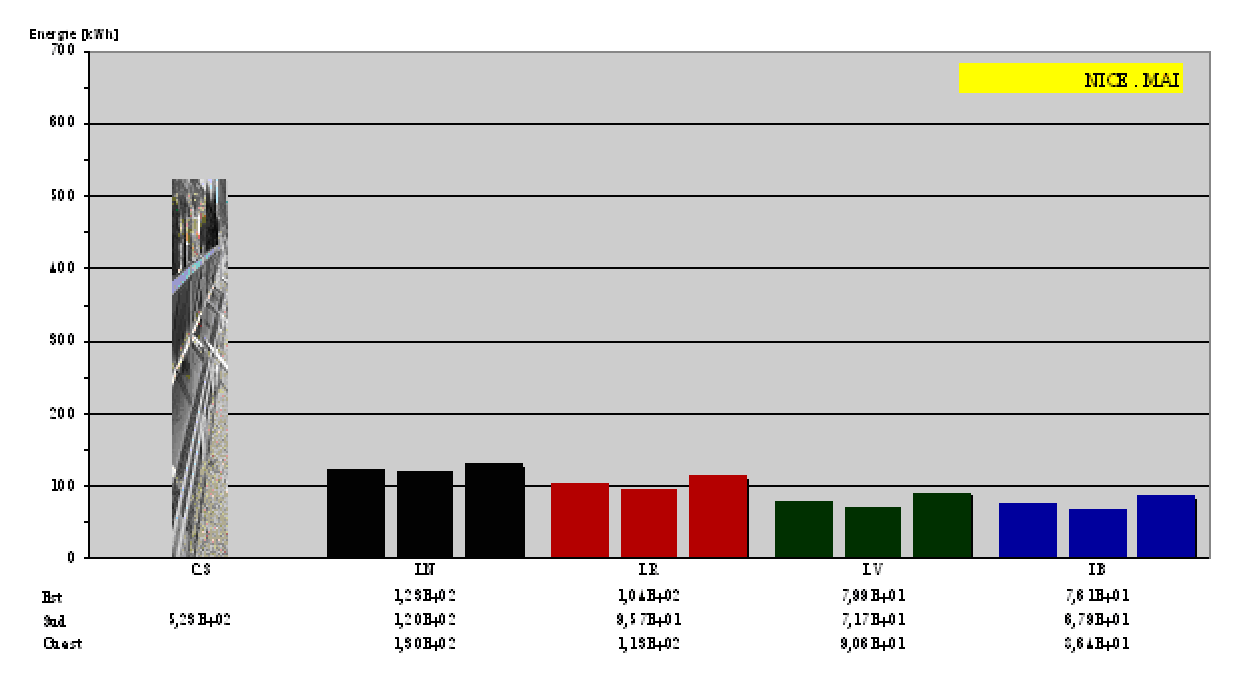


Figure C-1-34 : Quantités d'énergie utile en Mai à Nice pour trois orientations.

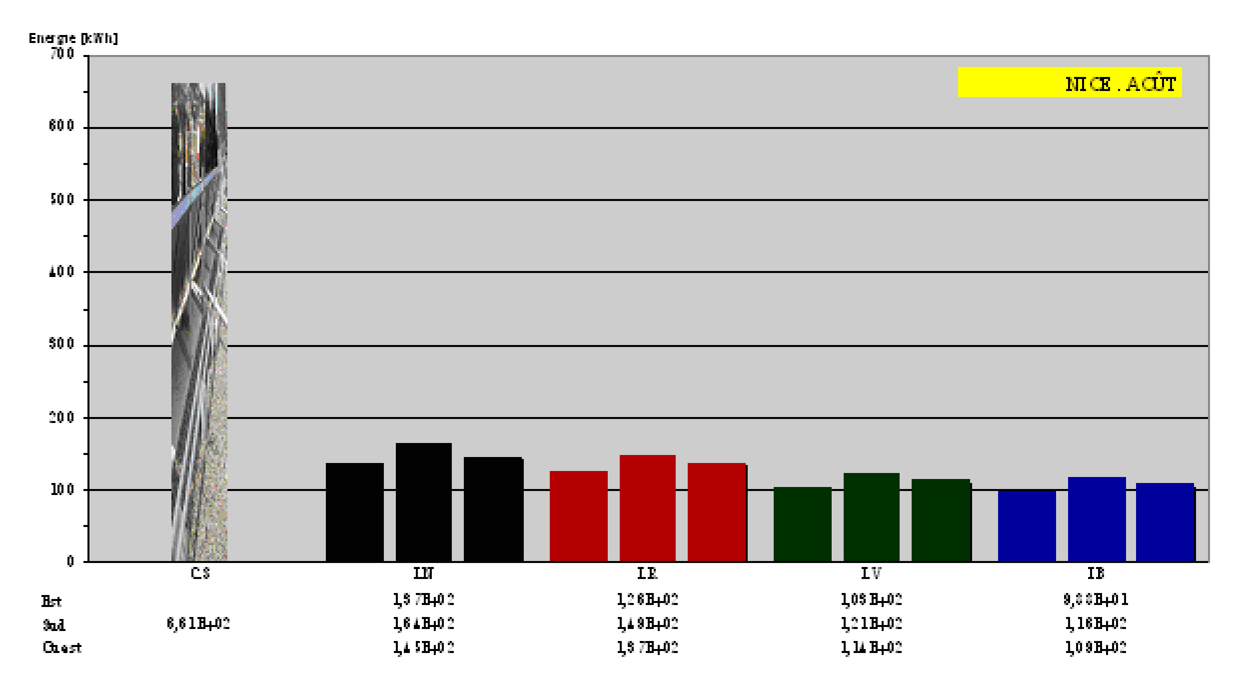


Figure C-1-35 : Quantités d'énergie utile en Août à Nice pour trois orientations.

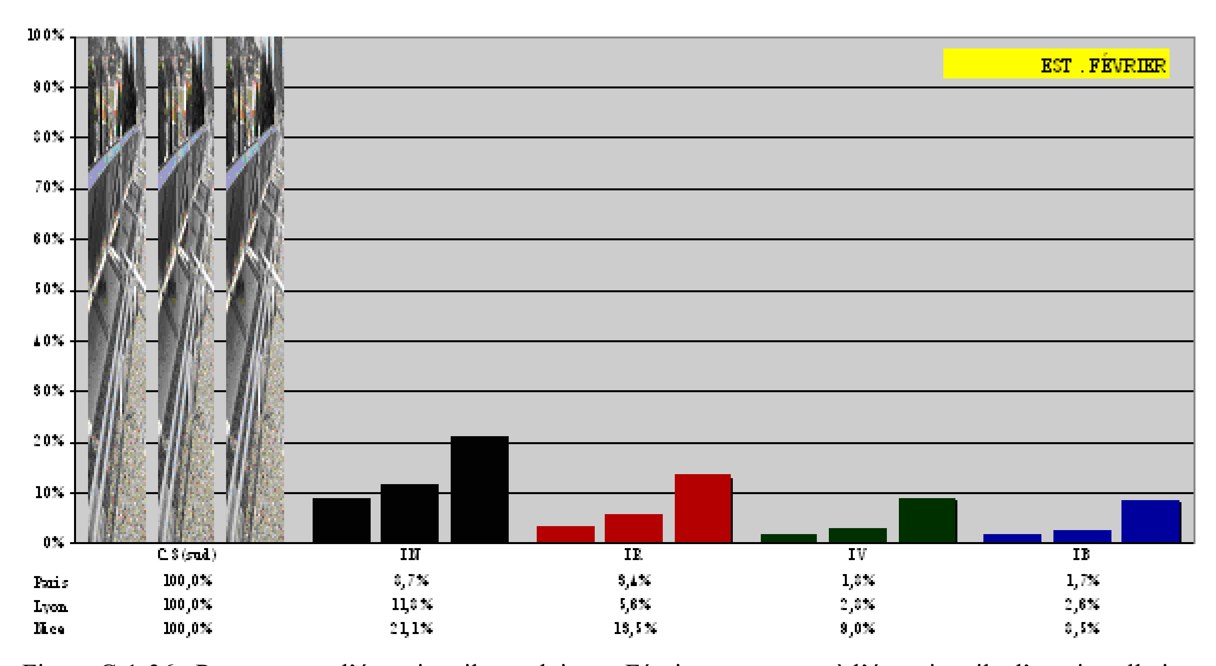


Figure C-1-36 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Est (az=270°).

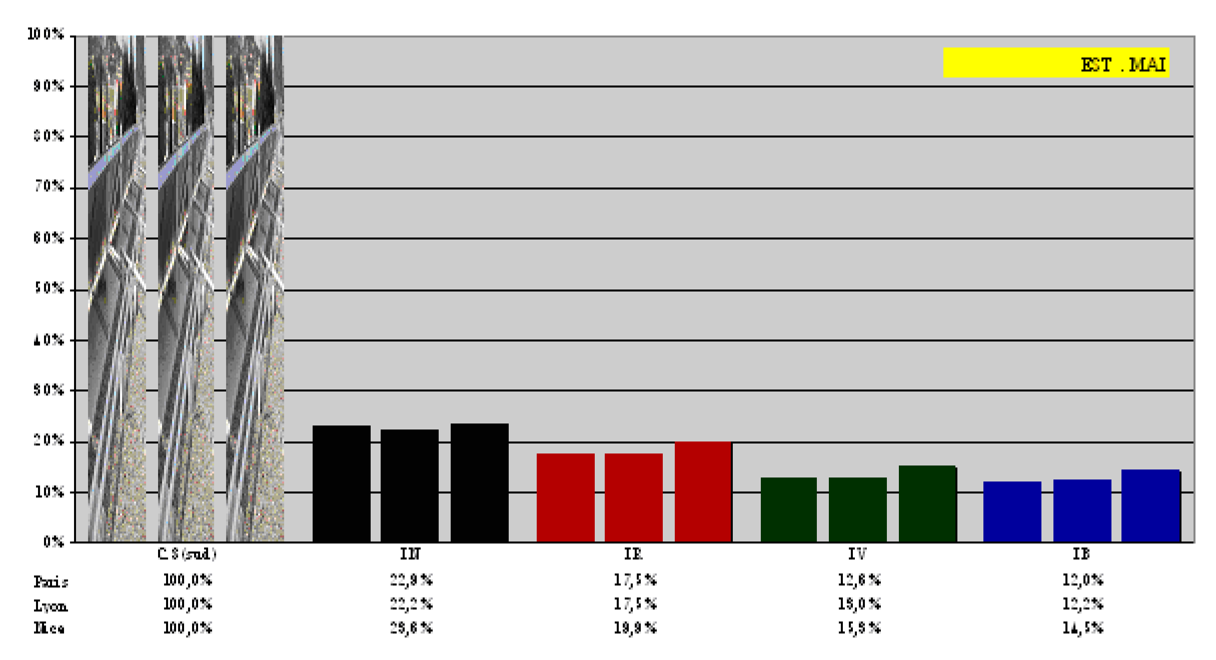


Figure C-1-37 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Est (az=270°).

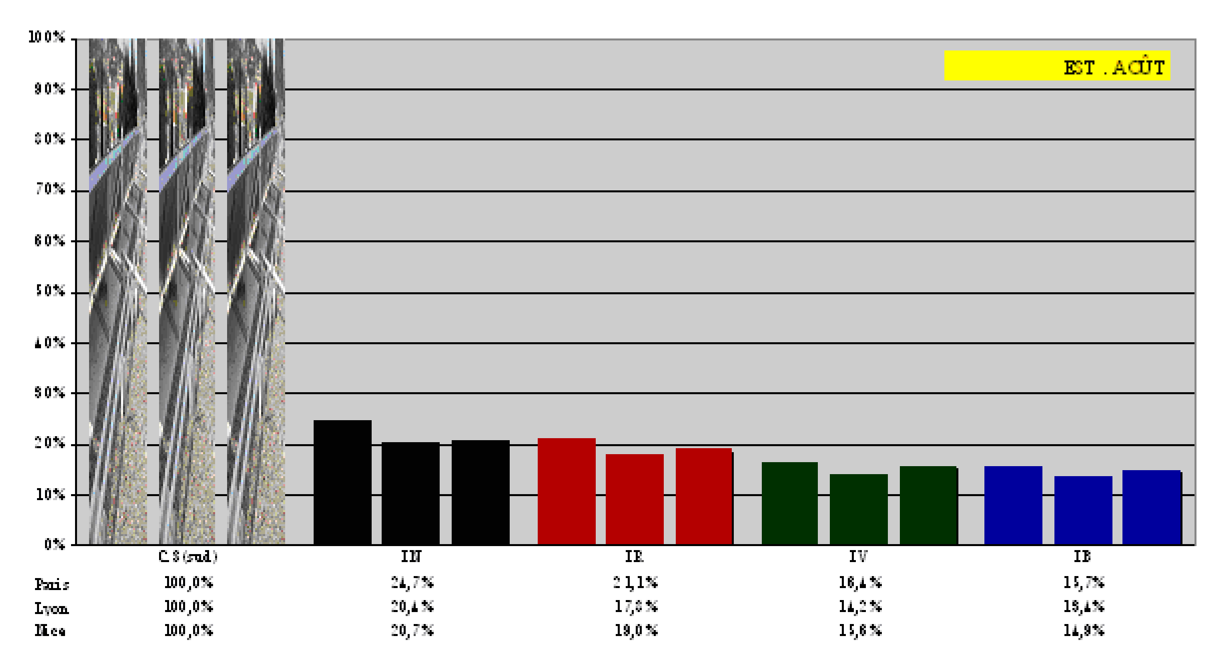


Figure C-1-38 : Pourcentage d'énergie utile produite en Août par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Est (az=270°).

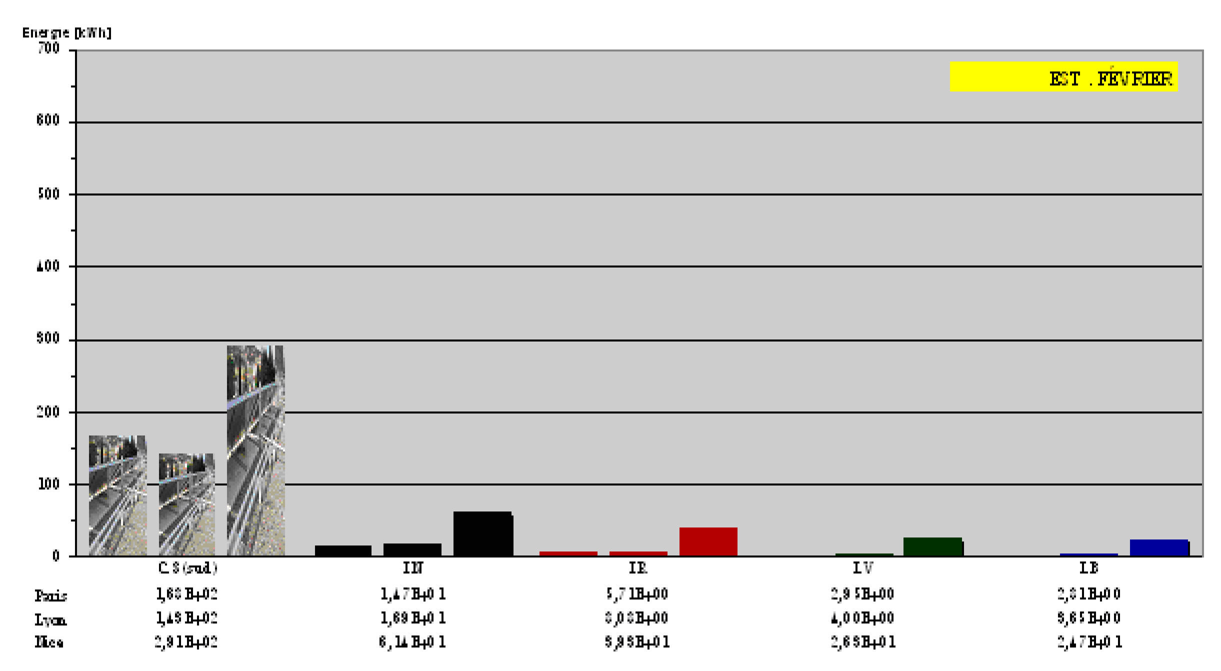


Figure C-1-39 : Quantités d’énergie utile en Février pour une orientation Est (az=270°).

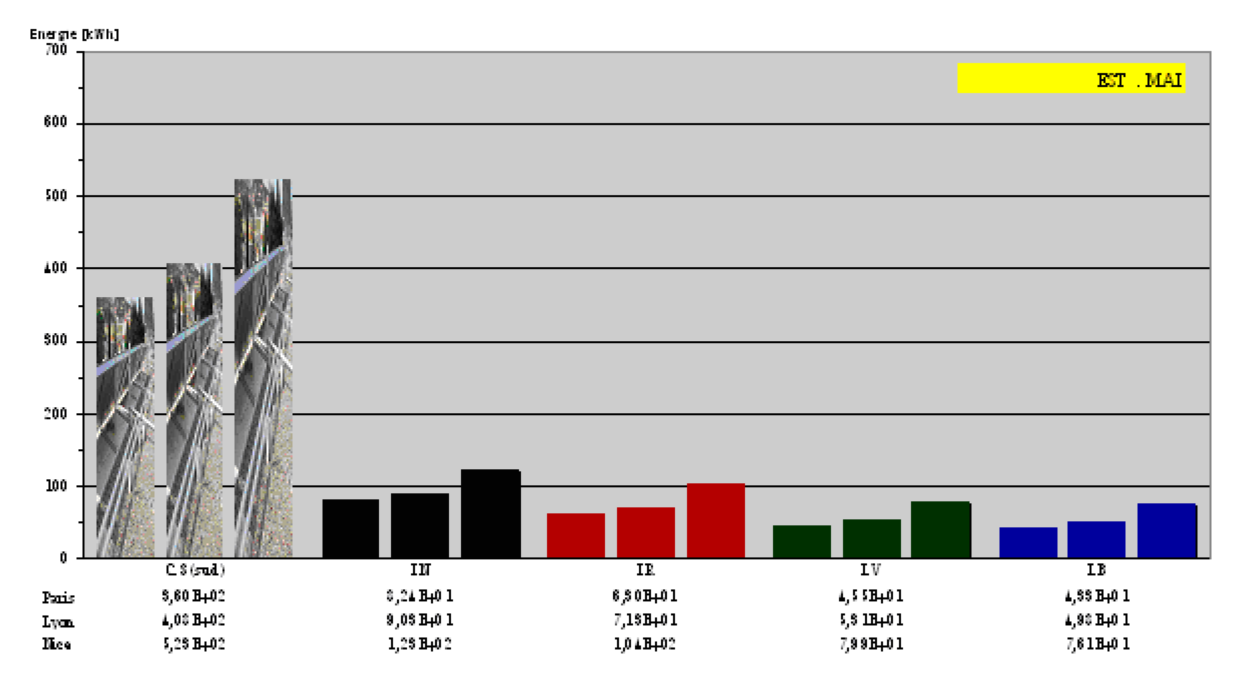


Figure C-1-40 : Quantités d’énergie utile en Mai pour une orientation Est (az=270°).

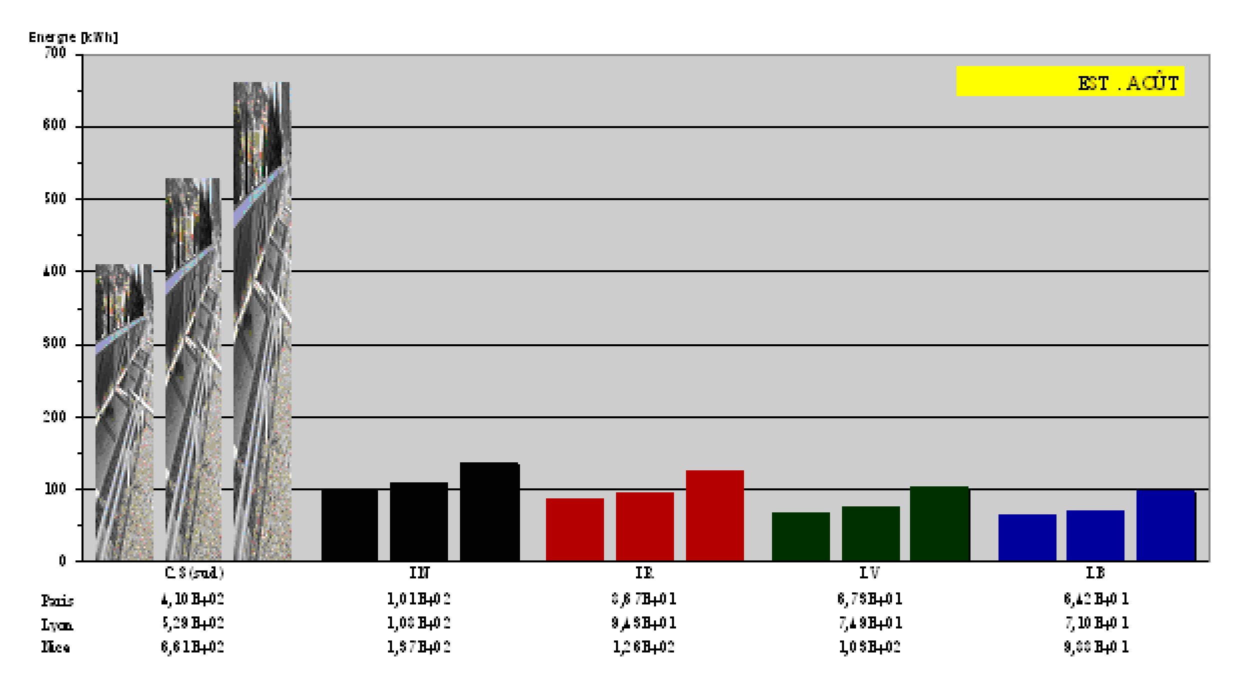


Figure C-1-41 : Quantités d'énergie utile en Août pour une orientation Est (az=270°).

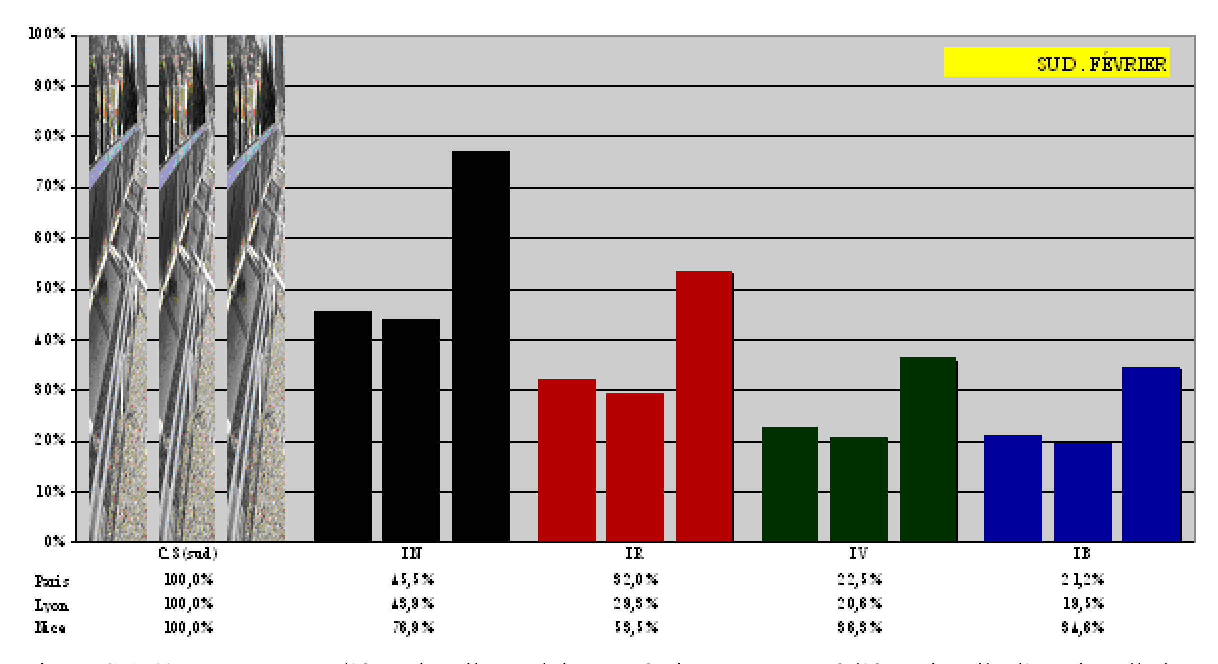


Figure C-1-42 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

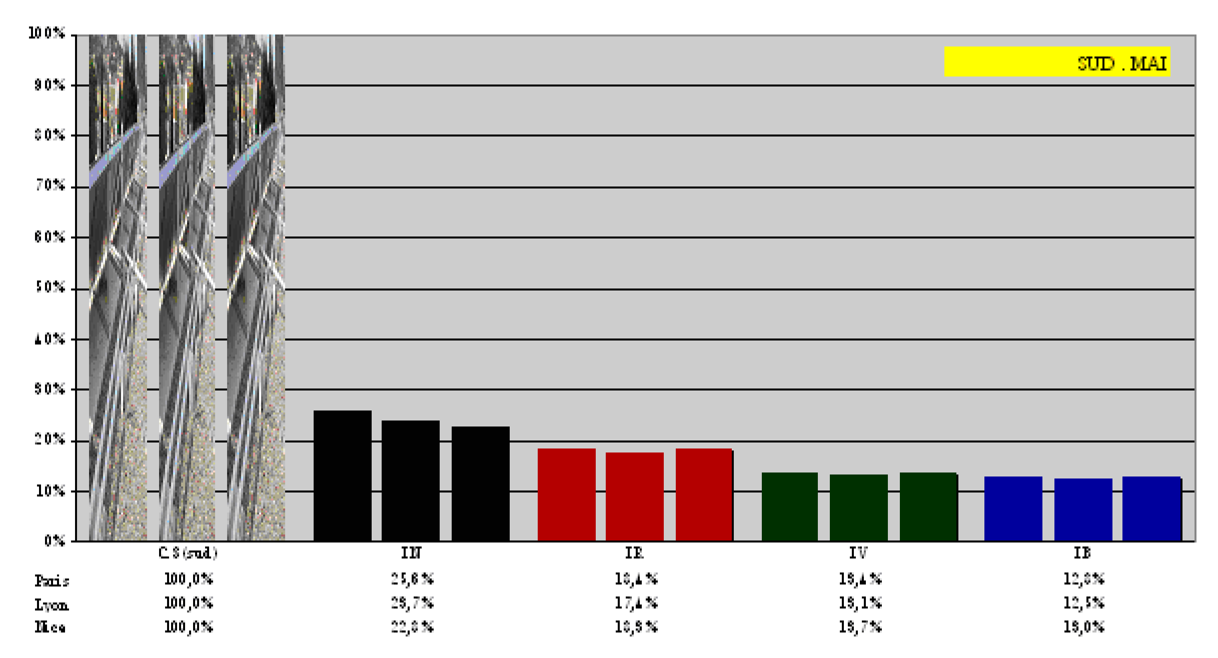


Figure C-1-43 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

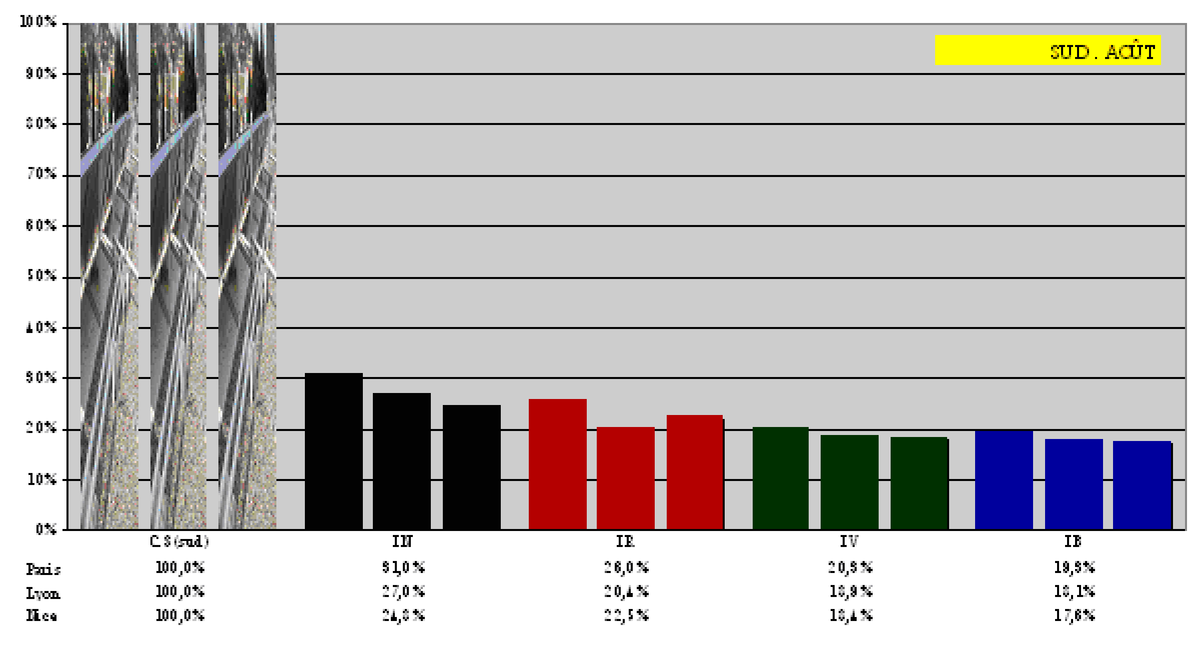


Figure C-1-44 : Pourcentage d'énergie utile produite en Août par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

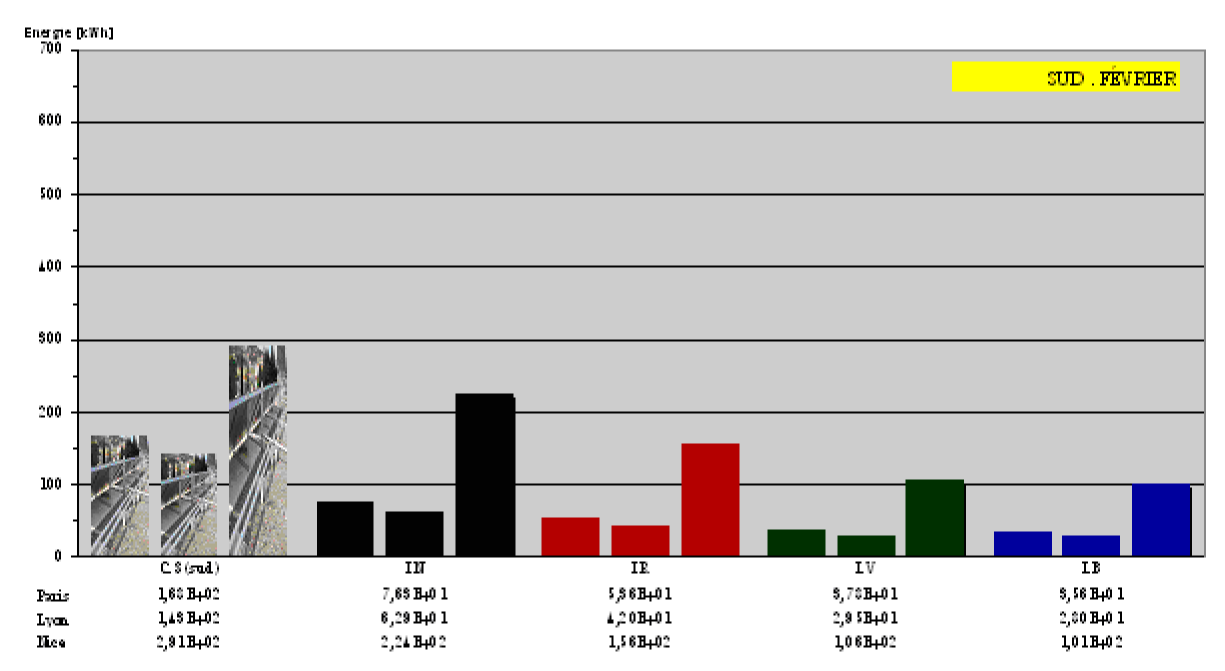


Figure C-1-45 : Quantités d’énergie utile en Février pour une orientation Sud (az=0°).

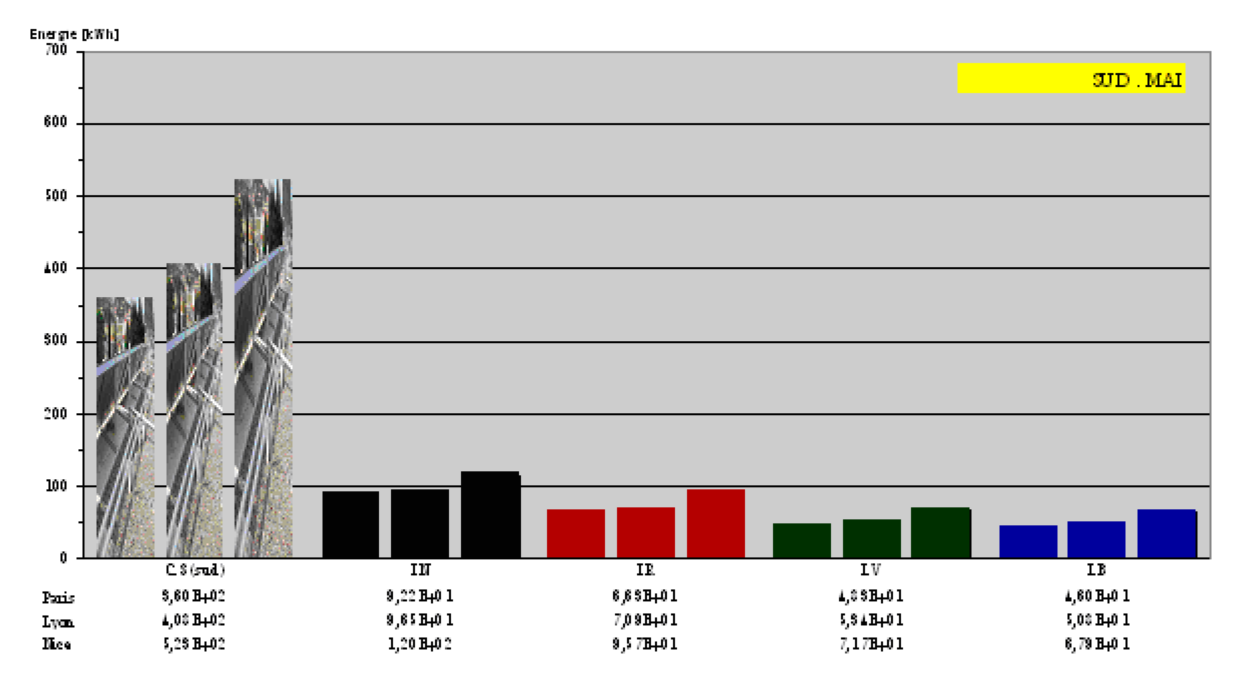


Figure C-1-46 : Quantités d’énergie utile en Mai pour une orientation Sud (az=0°).

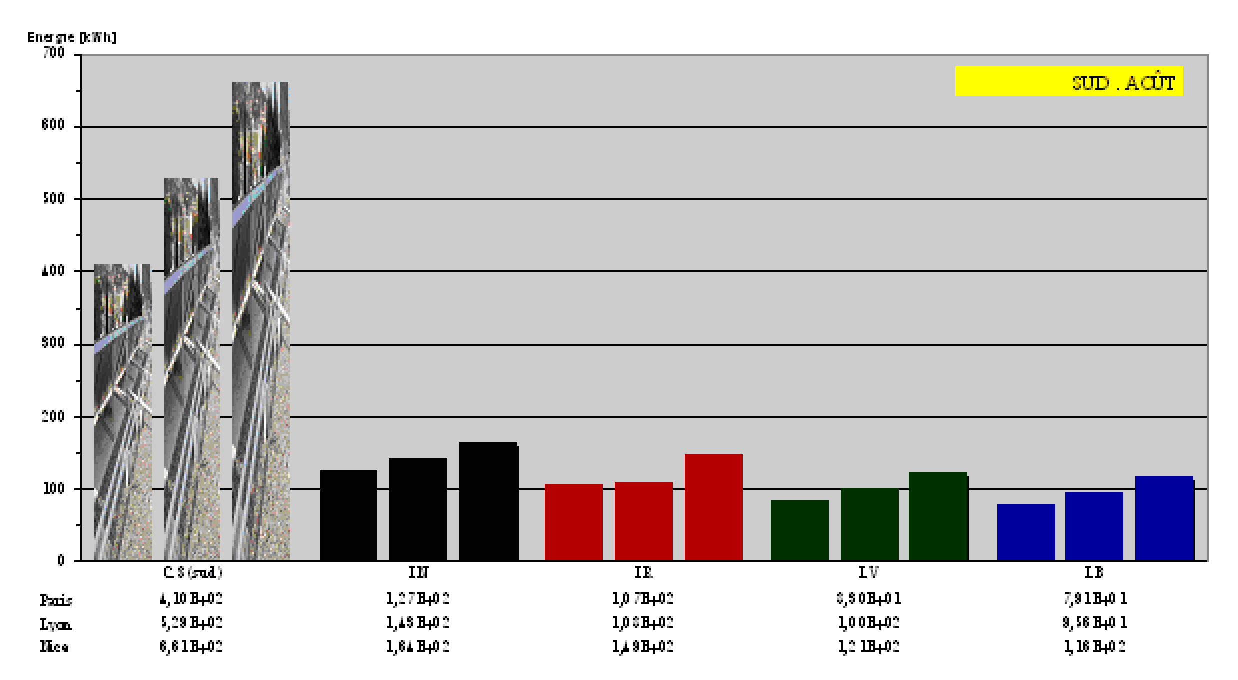


Figure C-1-47 : Quantités d'énergie utile en Août pour une orientation Sud (az=0°).

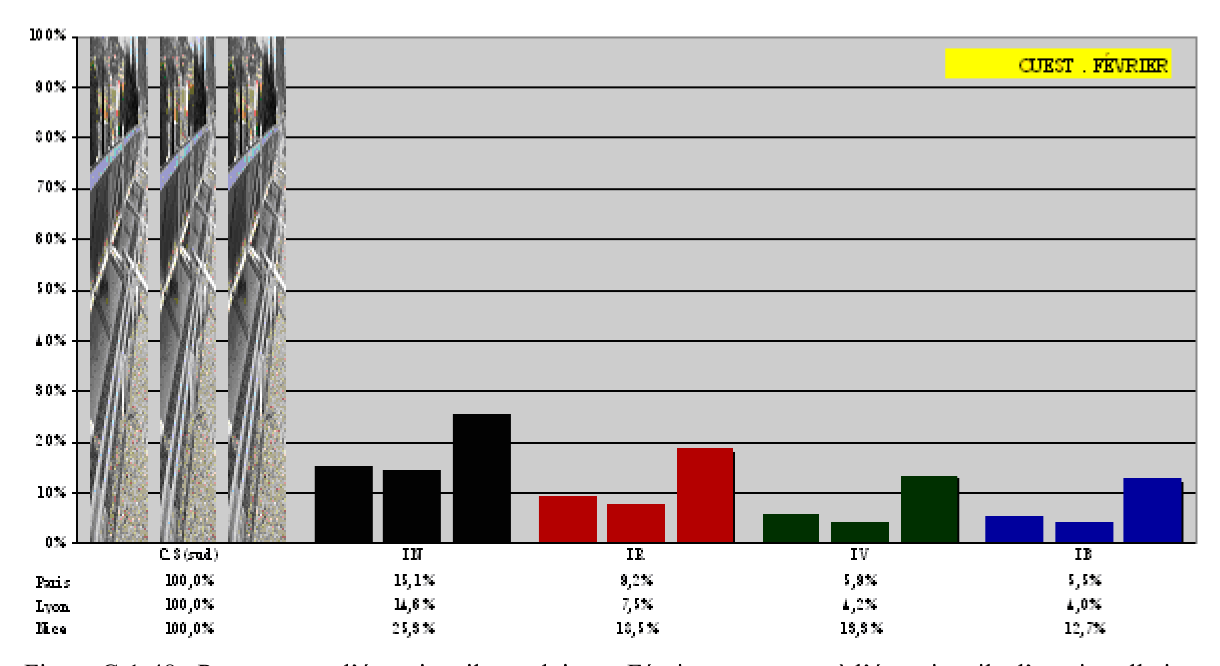


Figure C-1-48 : Pourcentage d'énergie utile produite en Février par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

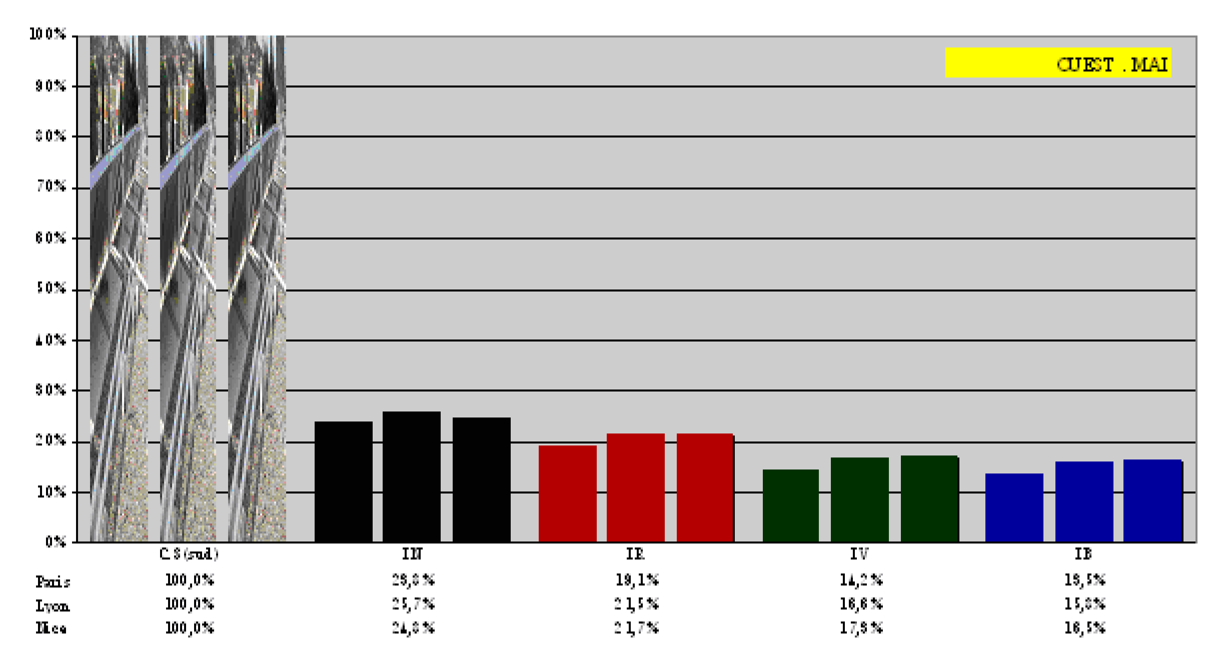


Figure C-1-49 : Pourcentage d'énergie utile produite en Mai par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

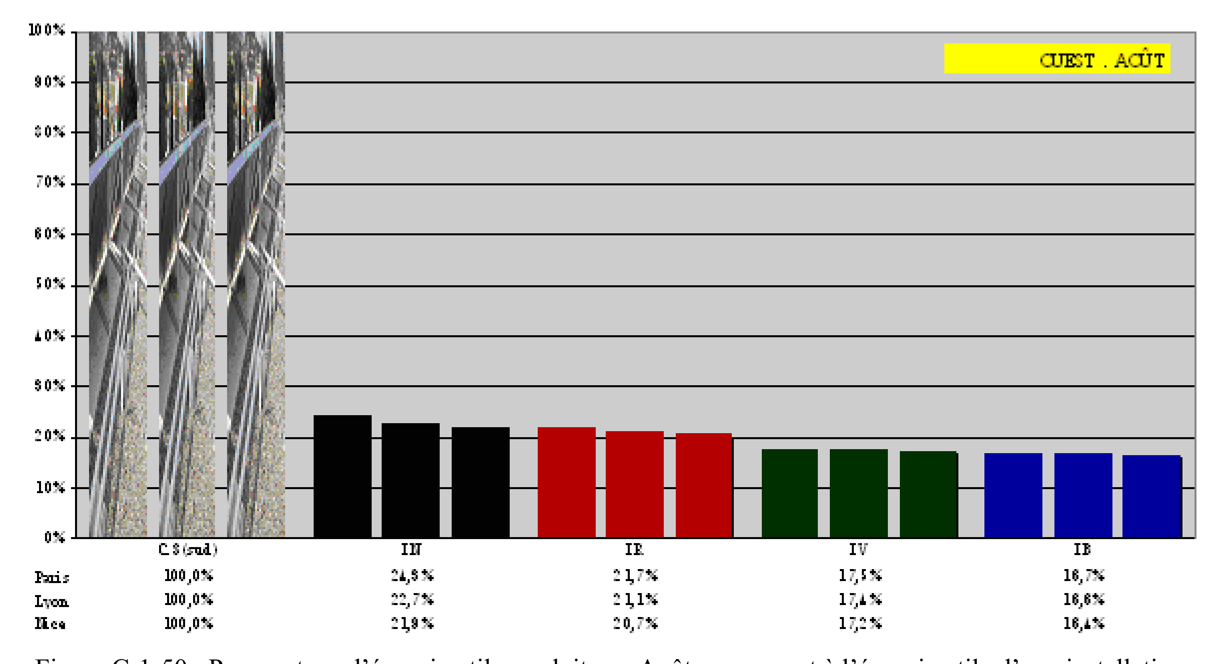


Figure C-1-50 : Pourcentage d'énergie utile produite en Août par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

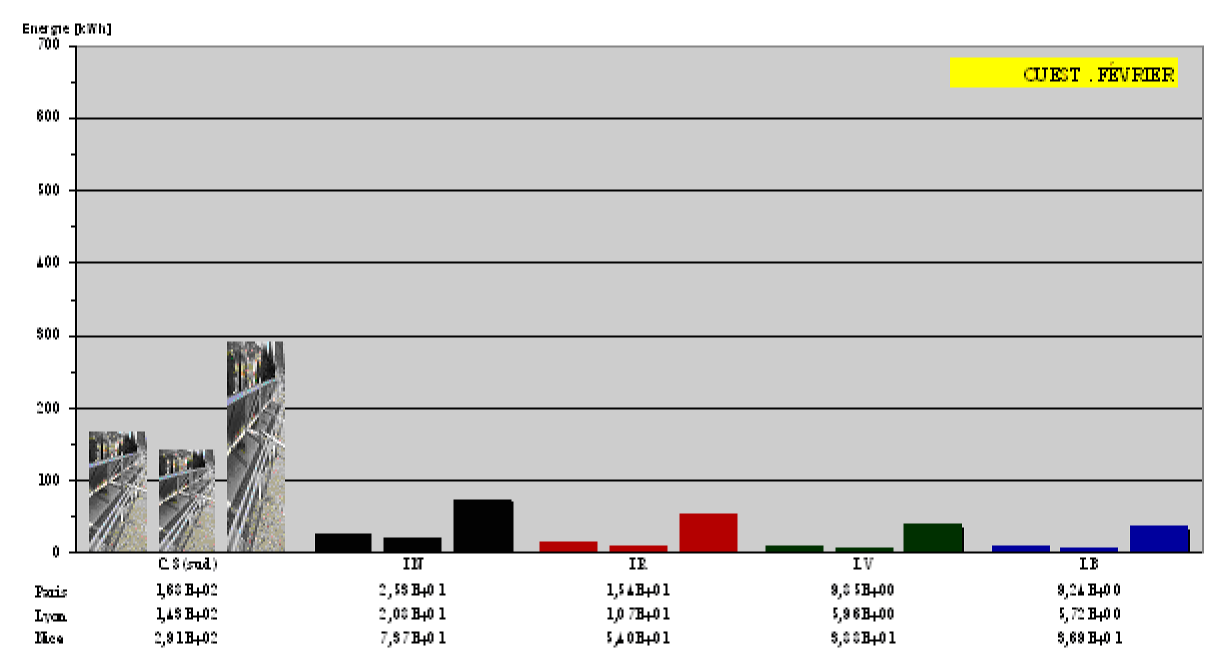


Figure C-1-51 : Quantités d'énergie utile en Février pour une orientation Ouest (az=90°).

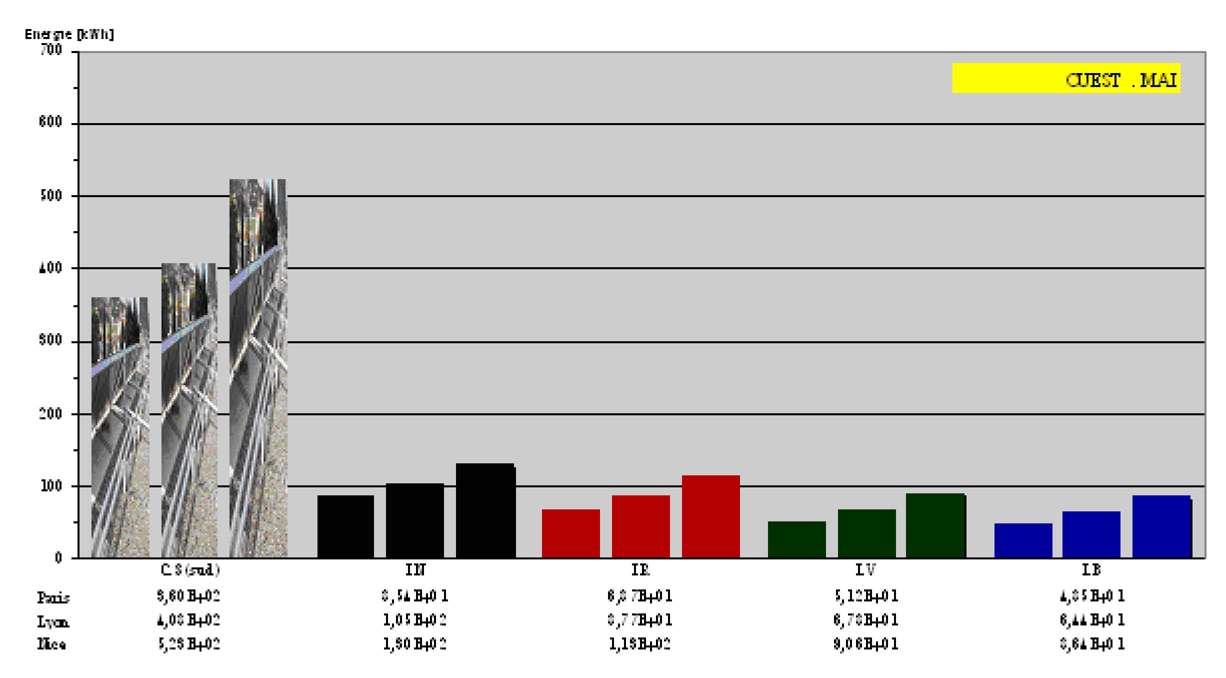


Figure C-1-52 : Quantités d'énergie utile en Mai pour une orientation Ouest (az=90°).

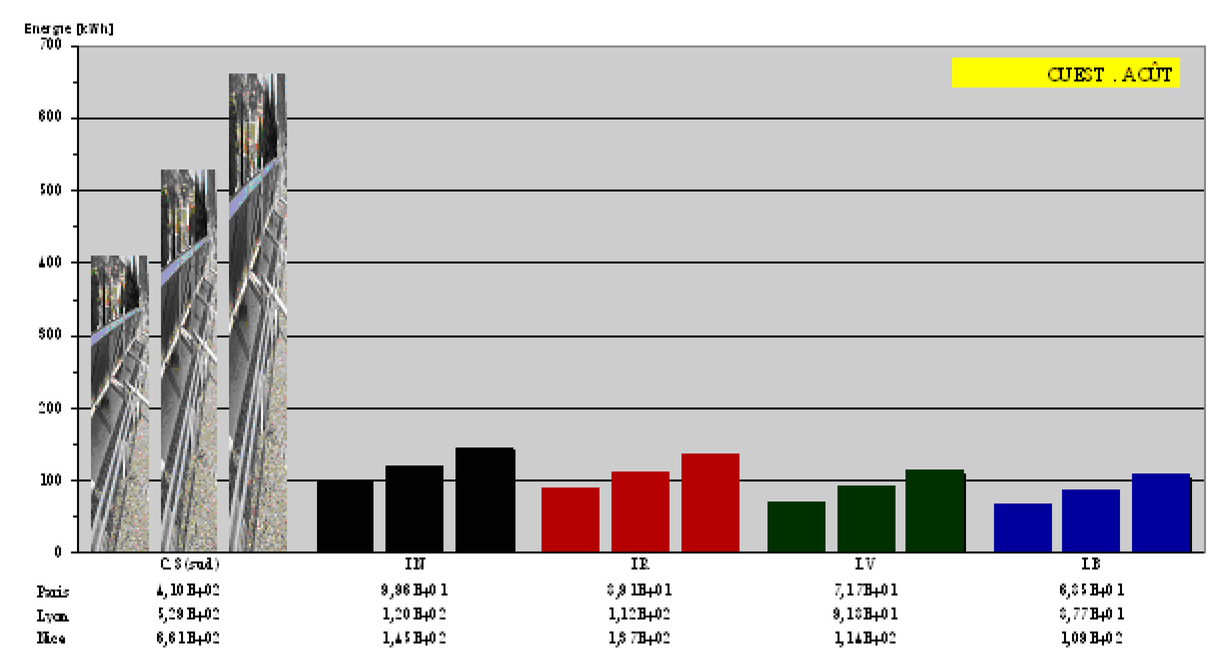


Figure C-1-53 : Quantités d'énergie utile en Août pour une orientation Ouest (az=90°).

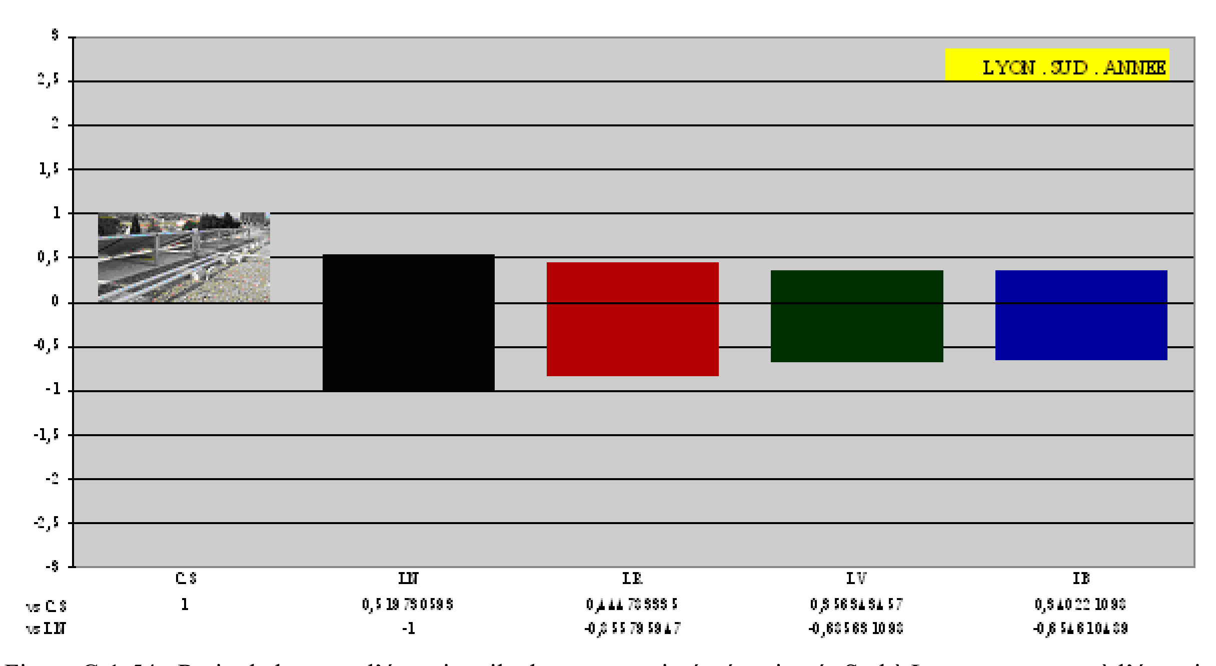


Figure C-1-54 : Ratio de la perte d'énergie utile des capteurs intégrés orientés Sud à Lyon par rapport à l'énergie utile de l'installation de référence (az=0).

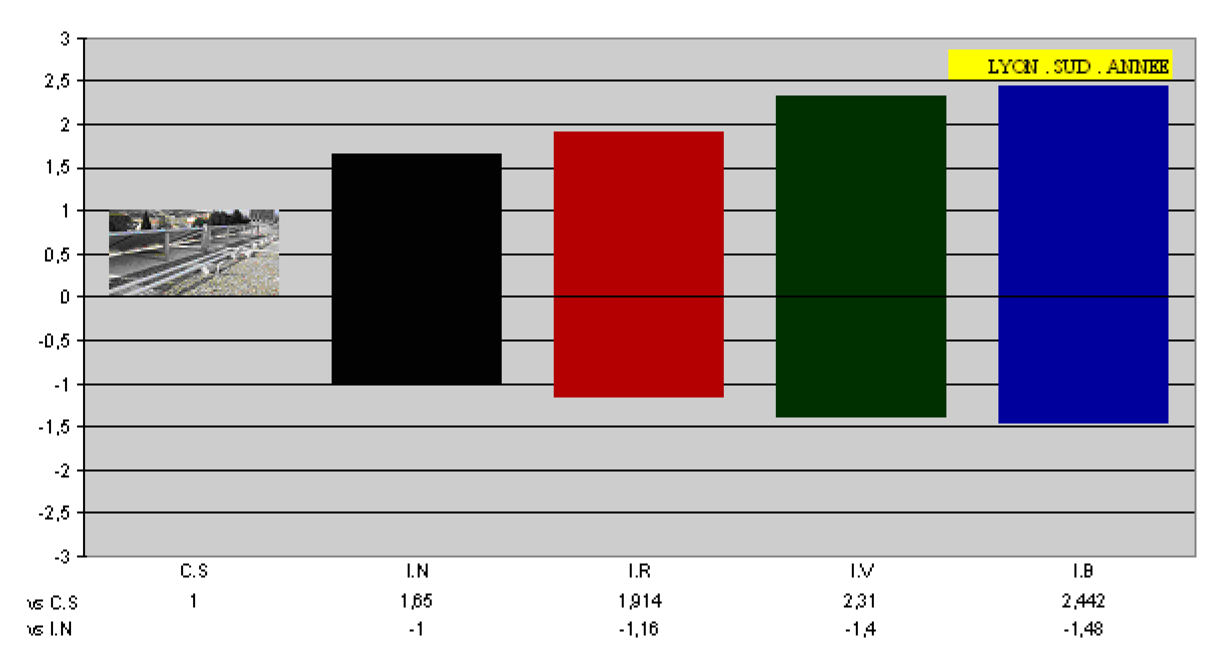


Figure C-1-55 : Ratio de la surface de captage nécessaire des capteurs intégrés orientés Sud à Lyon pour produire une même quantité d'énergie utile que l'installation de référence (az=0).

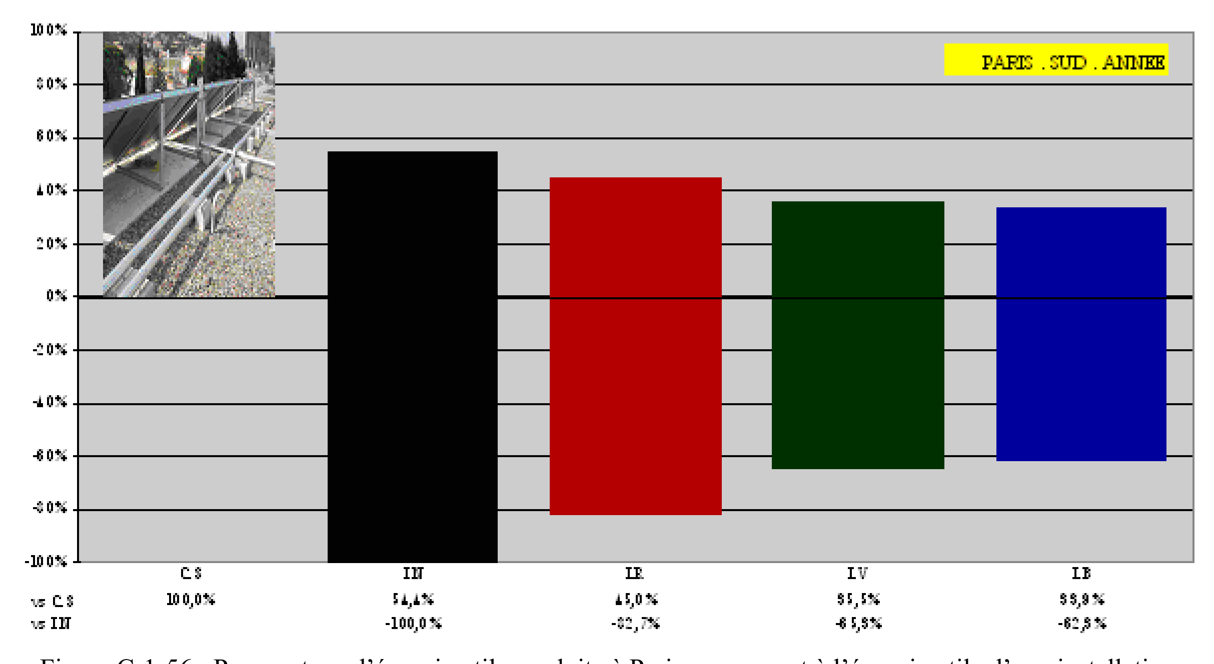


Figure C-1-56 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

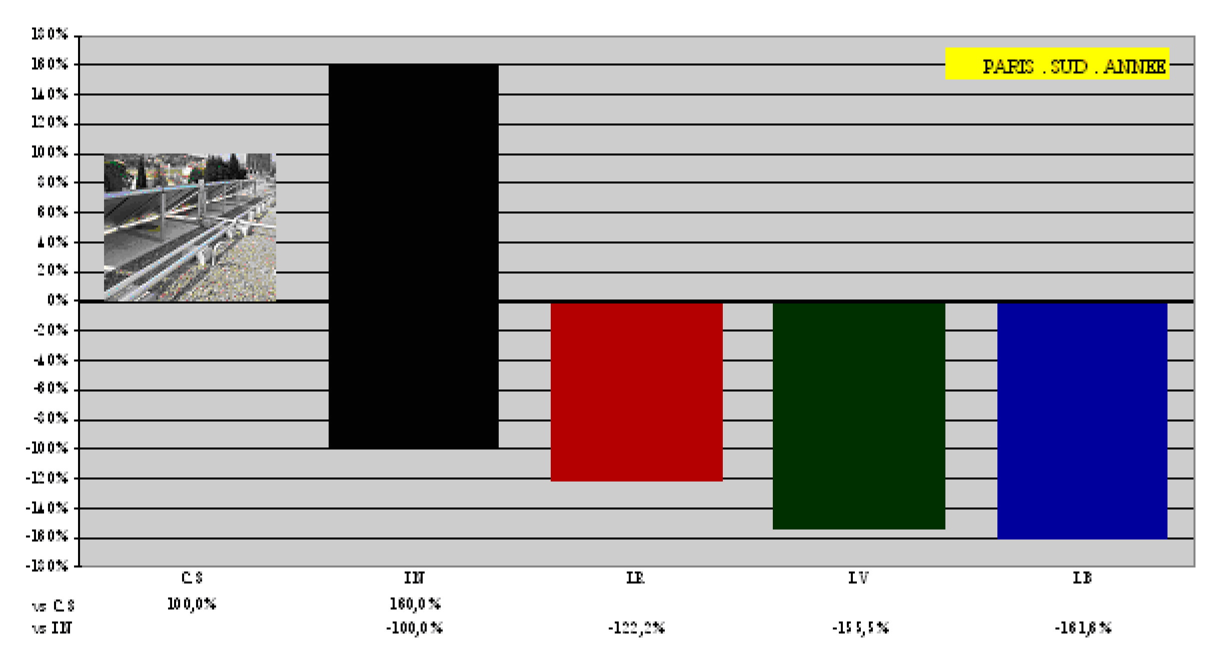


Figure C-1-57 : Pourcentage d'énergie utile produite à Paris par rapport à l'énergie utile d'une installation avec un capteur noir intégré pour une orientation Sud (az=0°).

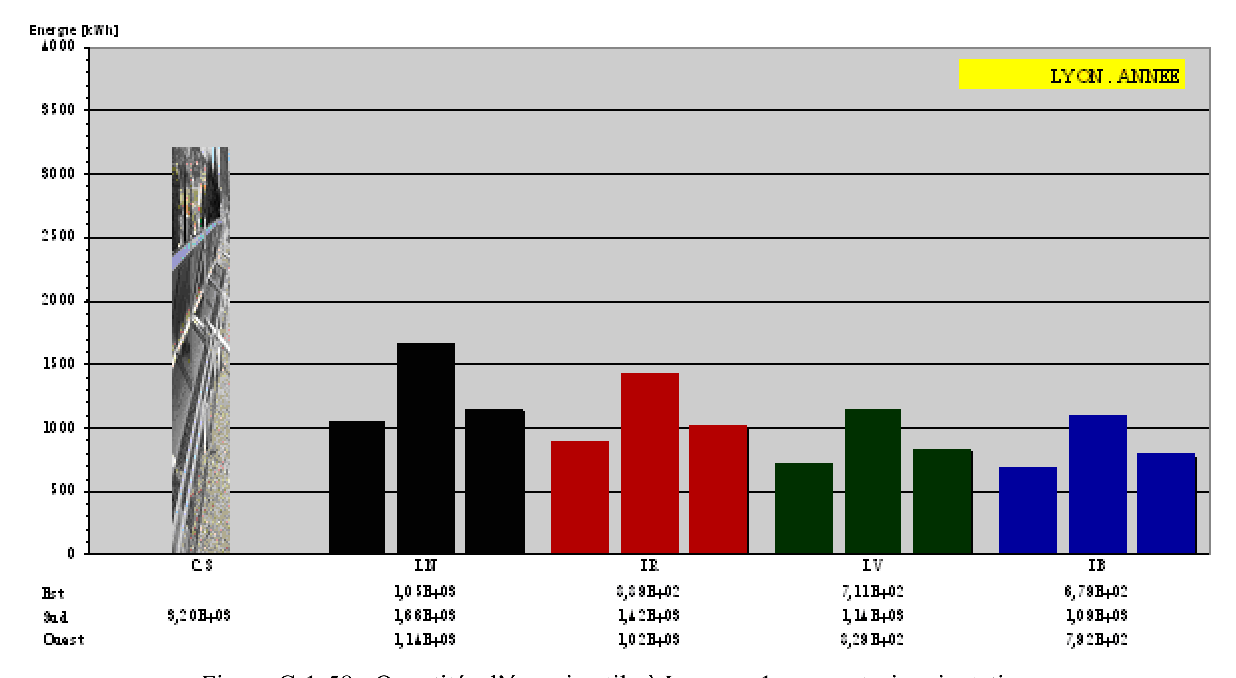


Figure C-1-58 : Quantités d'énergie utile à Lyon en 1an pour trois orientations.

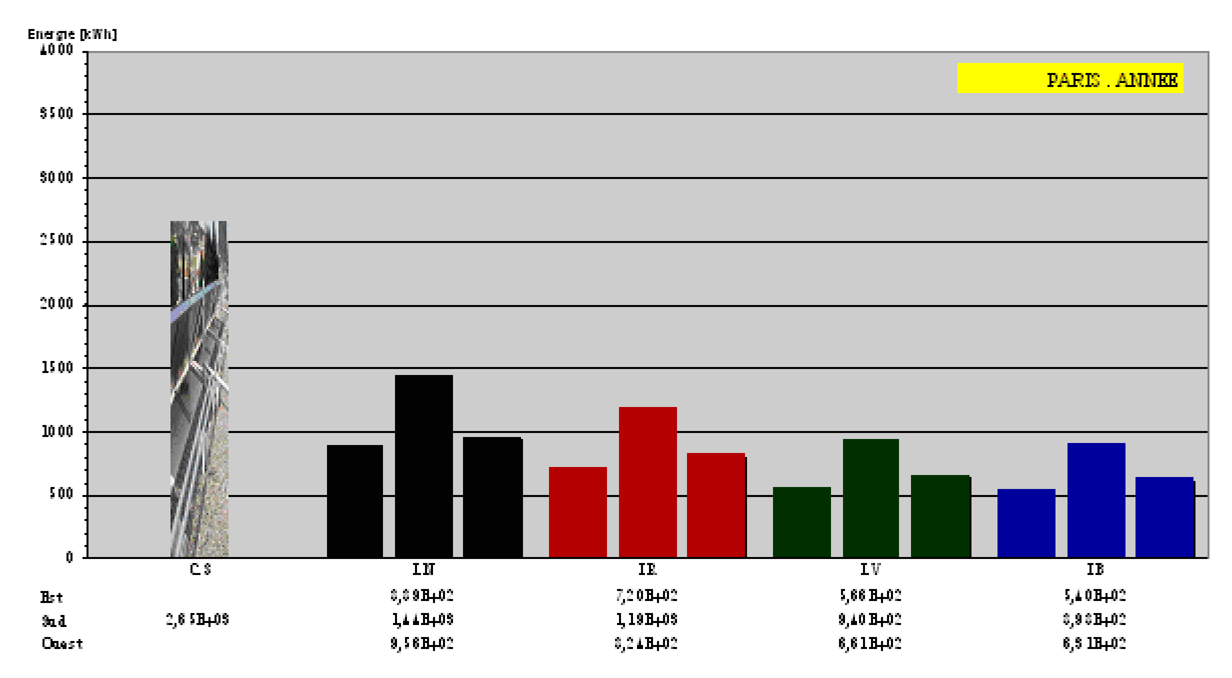


Figure C-1-59 : Quantités d'énergie utile à Paris en 1an pour trois orientations.

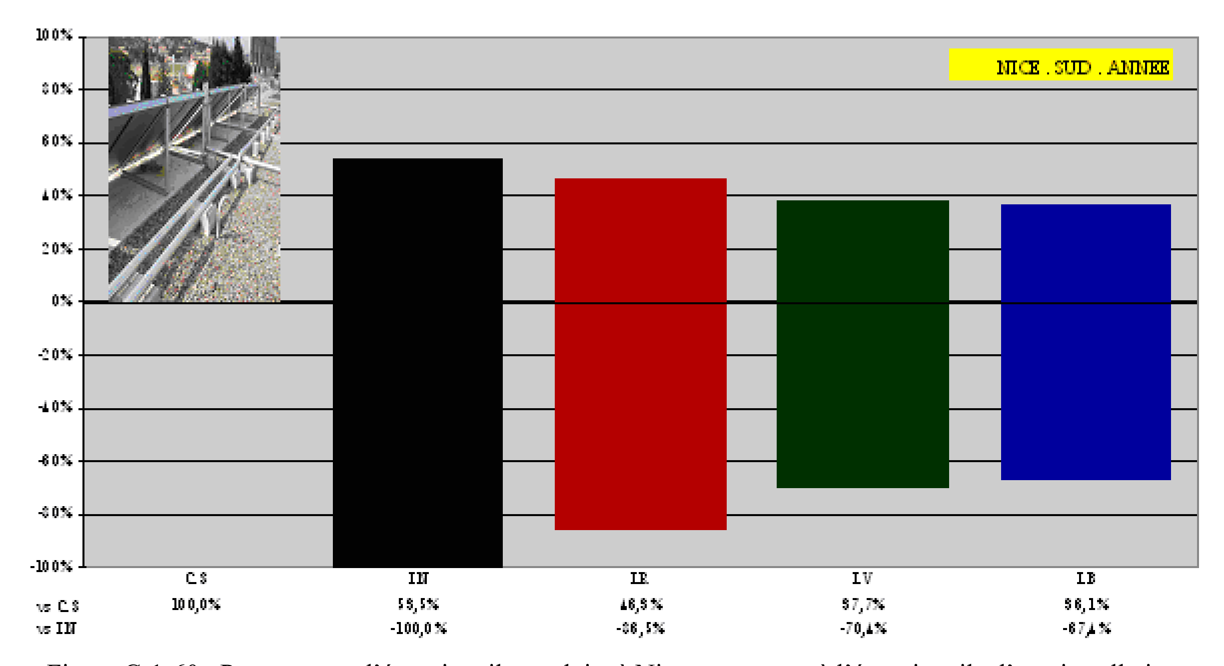


Figure C-1-60 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

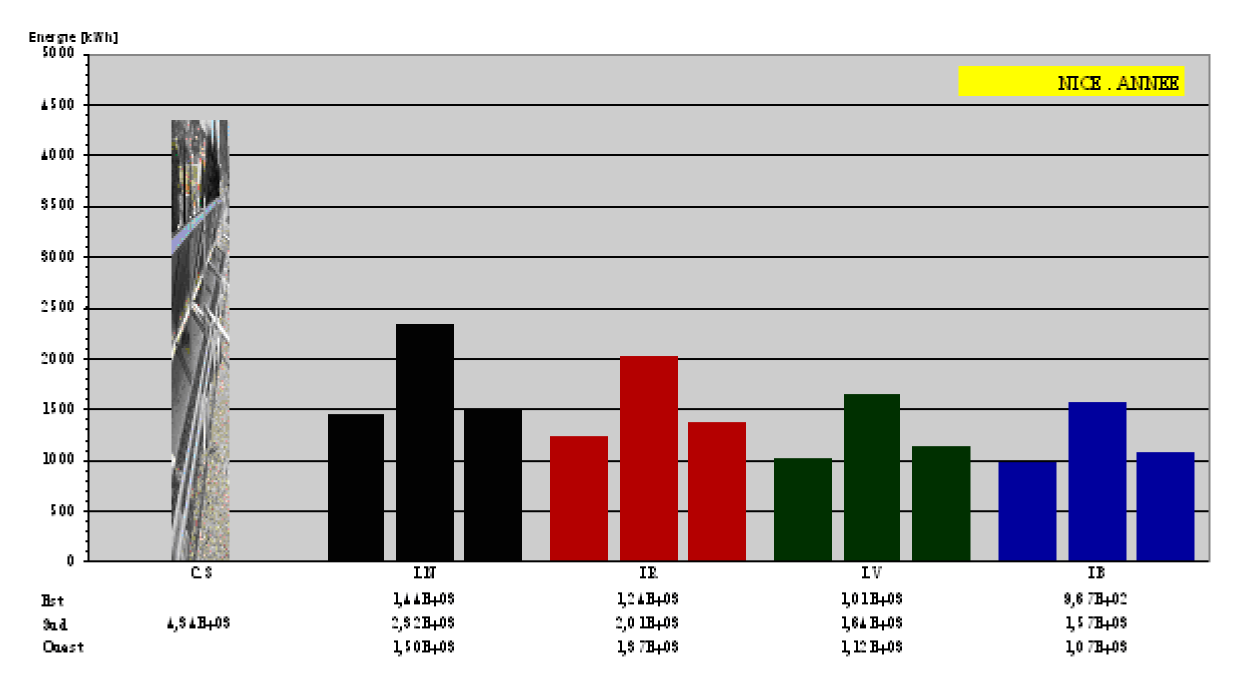


Figure C-1-61 : Quantités d'énergie utile à Lyon en 1an pour trois orientations.

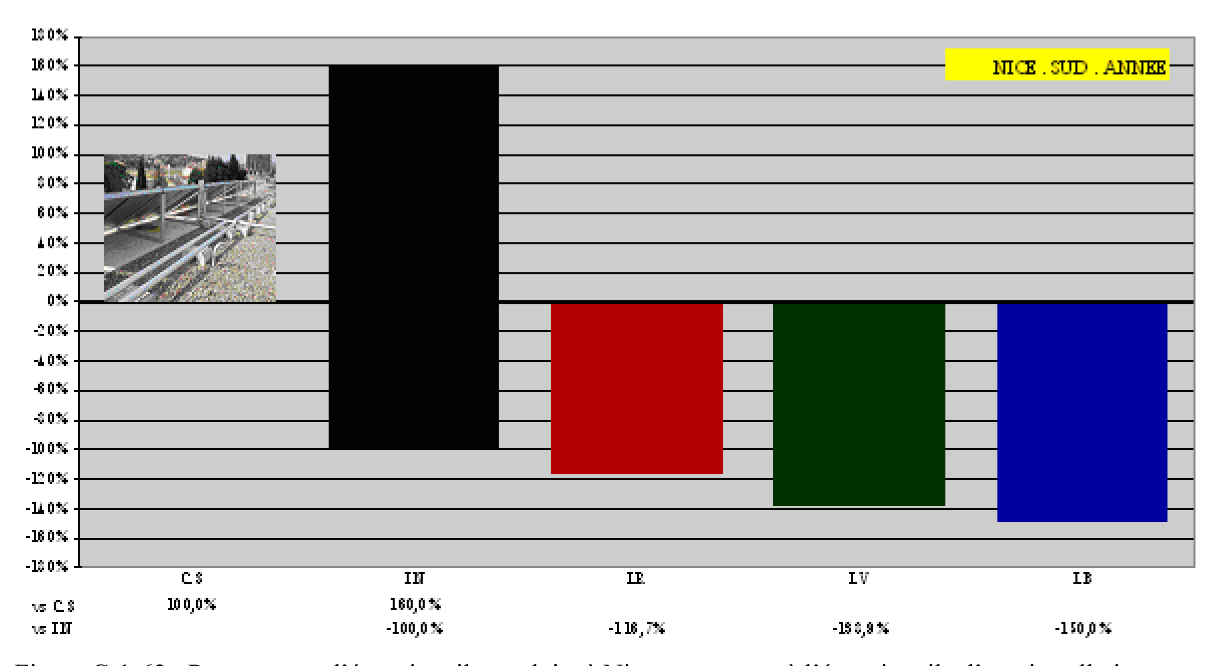


Figure C-1-62 : Pourcentage d'énergie utile produite à Nice par rapport à l'énergie utile d'une installation avec un capteur noir intégré pour une orientation Sud (az=0°).

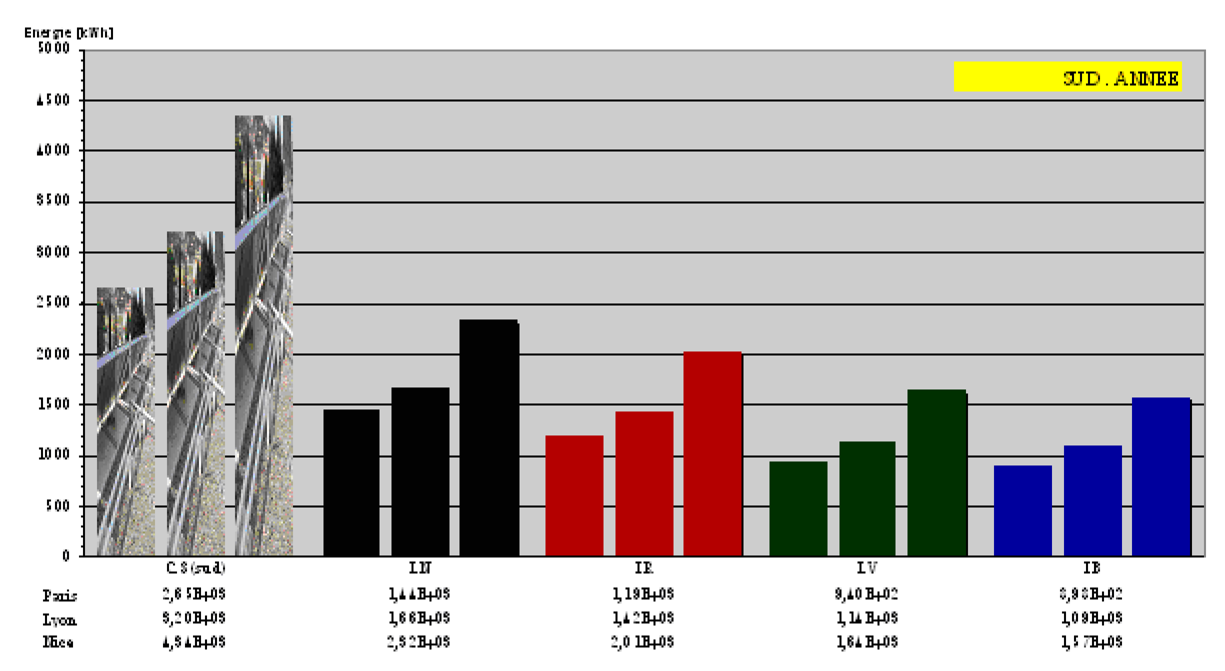


Figure C-1-63 : Quantités d’énergie utile en 1an pour une orientation Sud (az=0°).

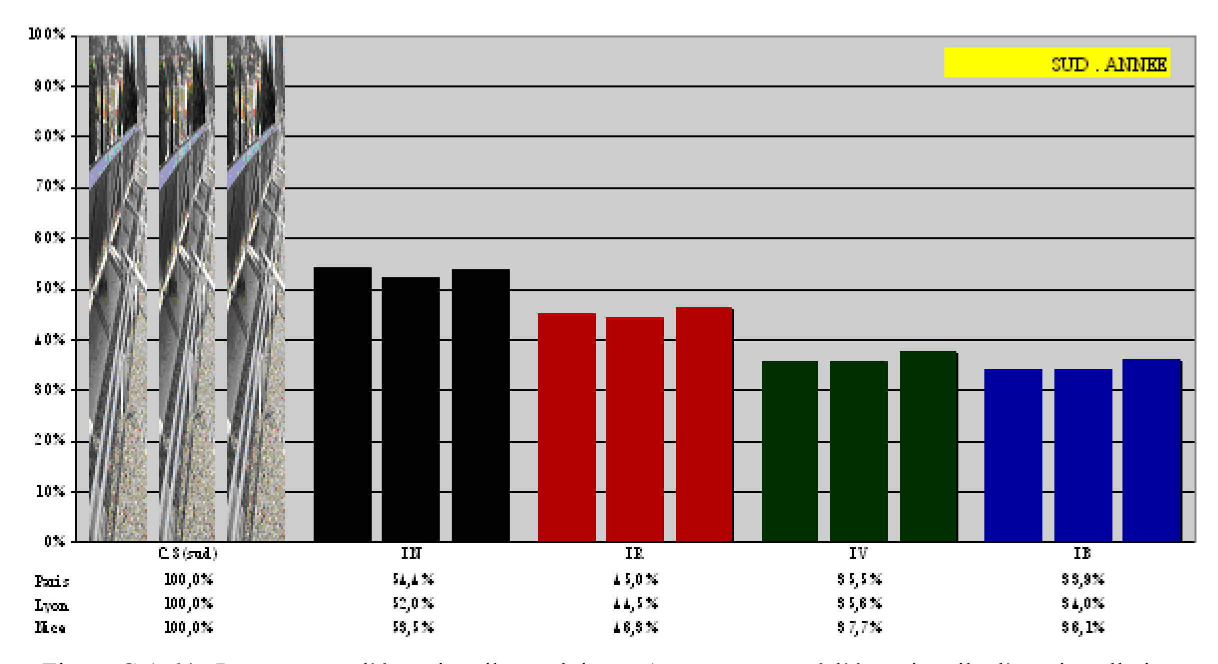


Figure C-1-64 : Pourcentage d’énergie utile produite en 1an par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Sud (az=0°).

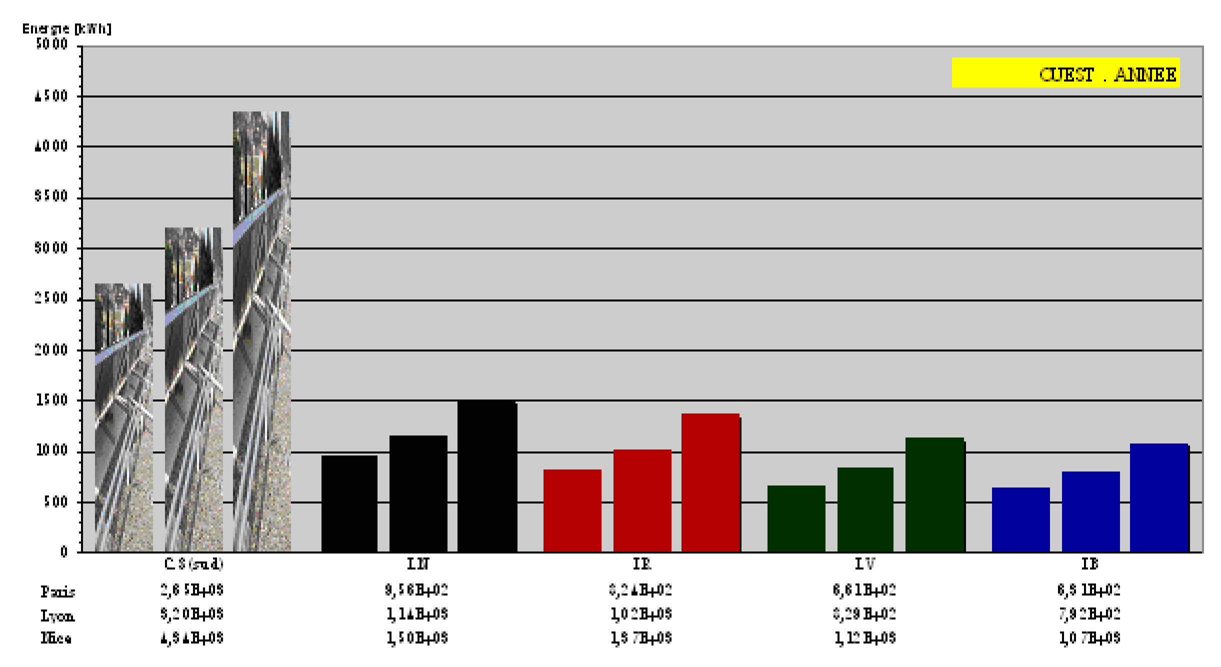


Figure C-1-65 : Quantités d'énergie utile en 1an pour une orientation Ouest (az=90°).

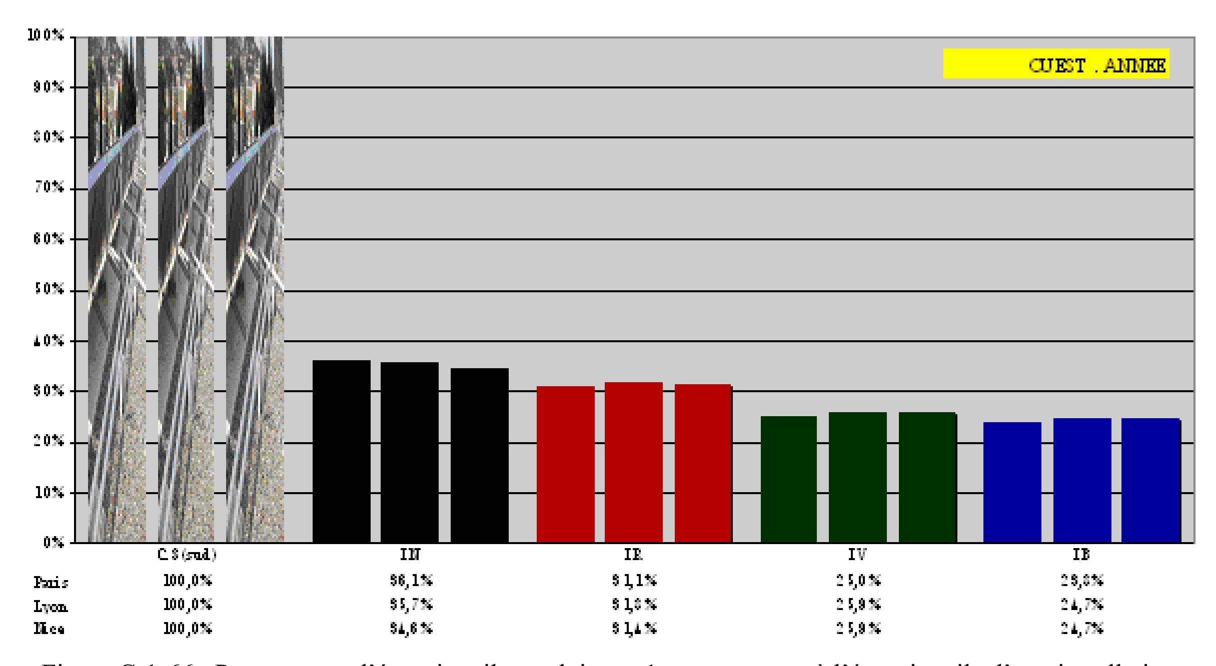


Figure C-1-66 : Pourcentage d'énergie utile produite en 1an par rapport à l'énergie utile d'une installation référence pour une orientation Ouest (az=90°).

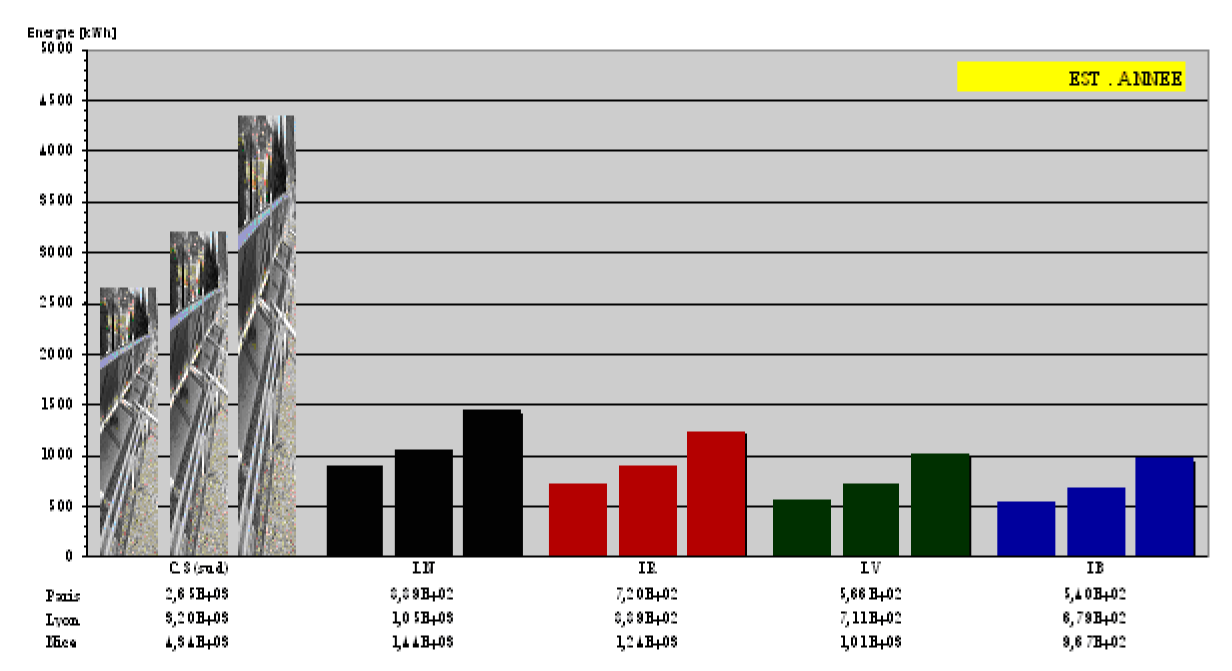


Figure C-1-67 : Quantités d’énergie utile en 1an pour une orientation Est (az=270°).

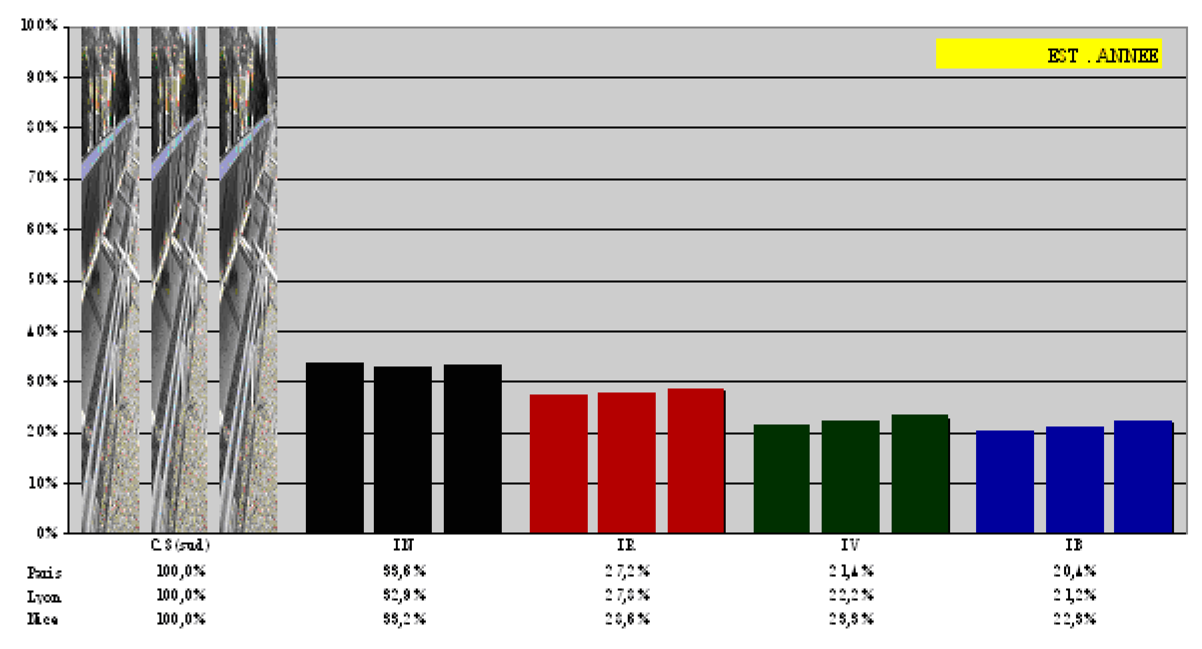


Figure C-1-68 : Pourcentage d’énergie utile produite en 1an par rapport à l’énergie utile d’une installation référence pour une orientation Est (az=270°).

C.1.2 La deuxième série de simulations

La deuxième série de résultats représente la production d'un système solaire d'ECS ayant 14m² de surface de captage et un ballon de stockage ayant un volume de 1000L. Les couleurs simulées sont le chrome noir (a= 95,6 et e=7,7), le RAL 7021 (gris noir, a= 95 et e=86), et le RAL 5020 (vert brun, a= 94 et e=95). Ces couleurs sont les mêmes qui sont utilisées dans les prototypes utilisés dans l'expérimentation.

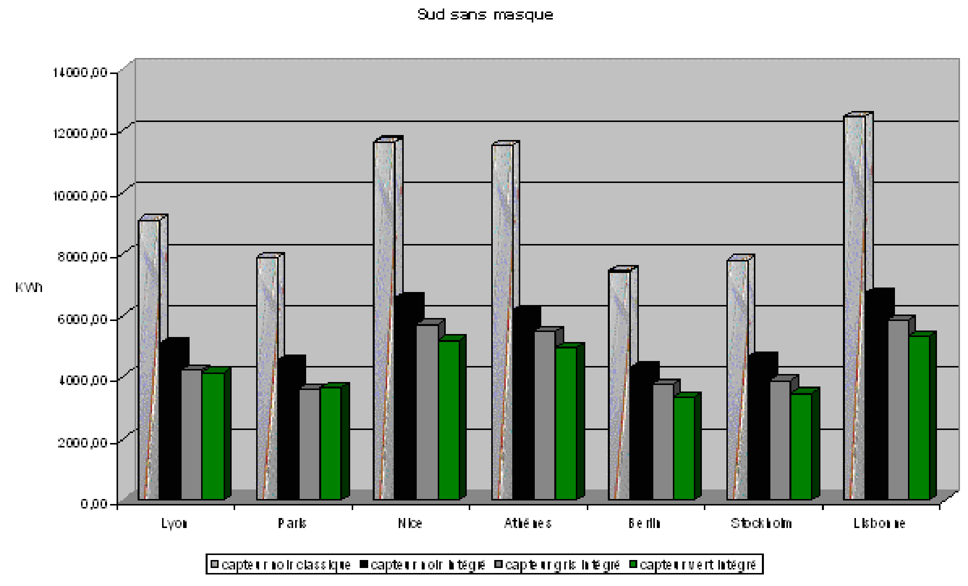


Figure C-1-69 : Quantités d'énergie utile produite pour une orientation Sud (az=0°) sans masque.

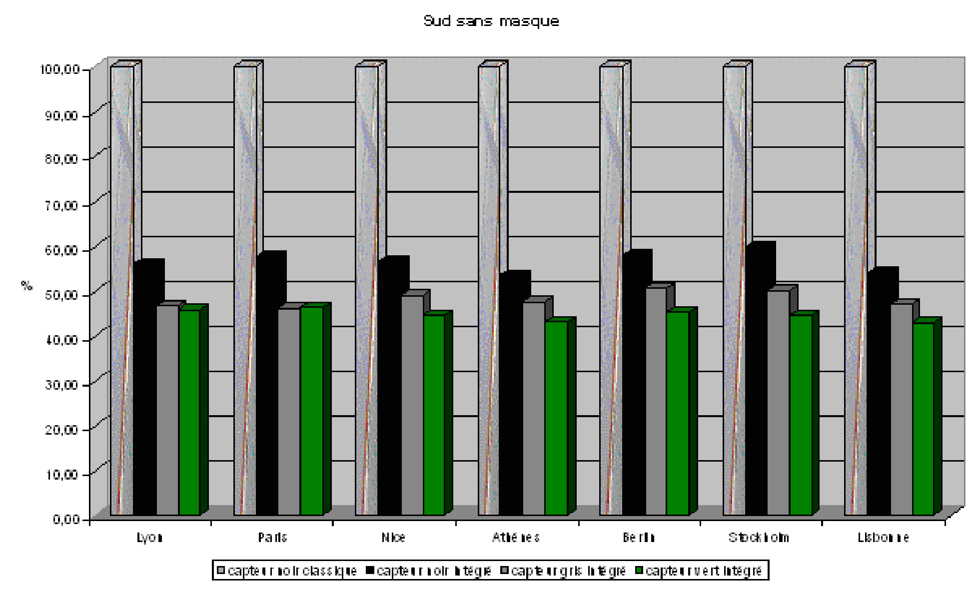


Figure C-1-70 : Pourcentages d'énergie utile produite pour une orientation Sud (az=0°) sans masque par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

Sud sans masque

2,50
2,00
1,50
Ratio
1,00
0,50
0,00
Lyon Paris Nice Athènes Berlin Stockholm Lisbonne
capteur noir classique capteur noir intégré capteur gris intégré capteur vert intégré

Figure C-1-71 : Coefficients de multiplication de la surface de captage pour une orientation Sud (az=0°) sans masque.

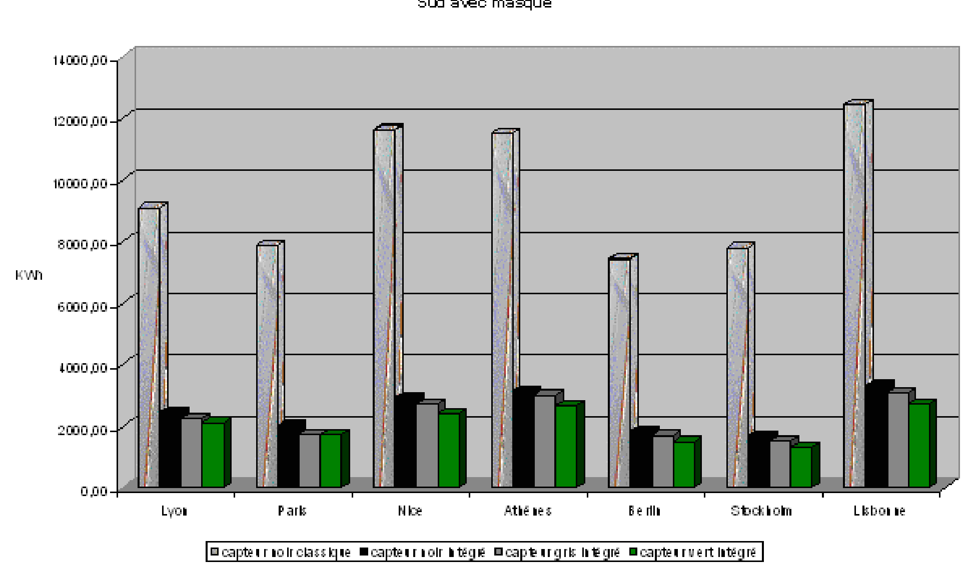


Figure C-1-72 : Quantités d’énergie utile produite pour une orientation Sud (az=0°) avec masque.

Sud avec masque

Figure C-1-73 : Pourcentages d'énergie utile produite pour une orientation Sud (az=0°) avec masque par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

Sud avec masque

Figure C-1-74 : Coefficients de multiplication de la surface de captage pour une orientation Sud (az=0°) avec masque.

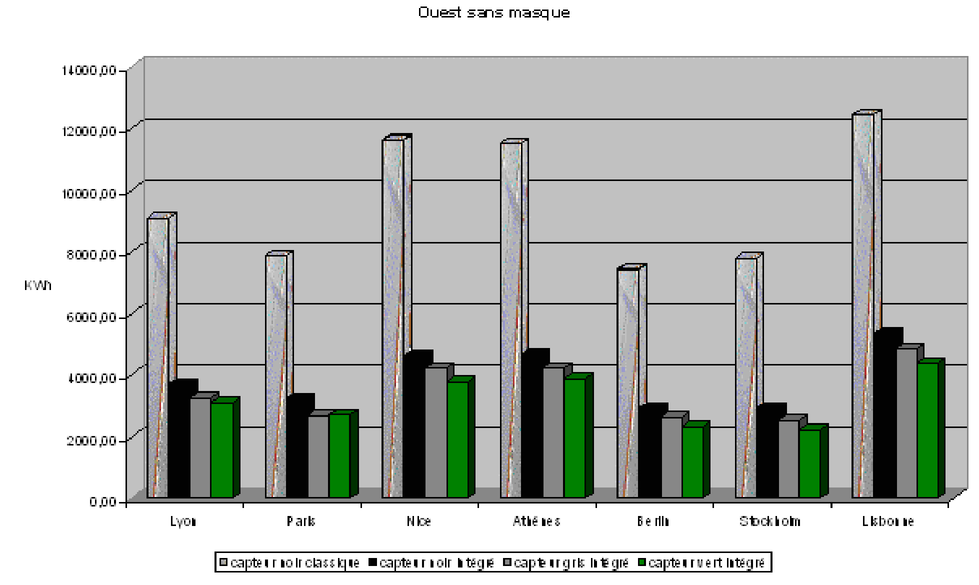


Figure C-1-75 : Quantités d'énergie utile produite pour une orientation Ouest (az=90°) sans masque.

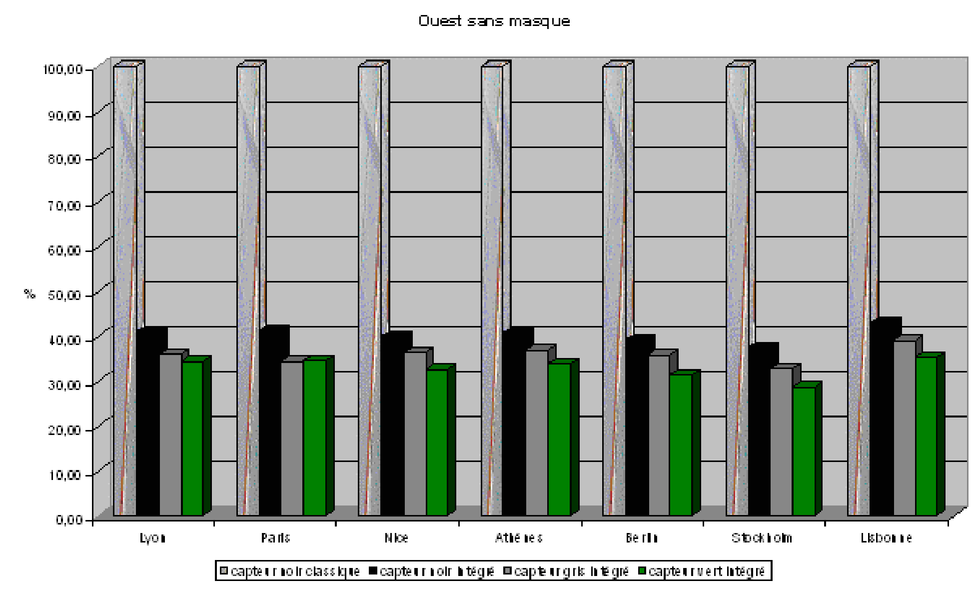


Figure C-1-76 : Pourcentages d'énergie utile produite pour une orientation Ouest (az=90°) sans masque par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

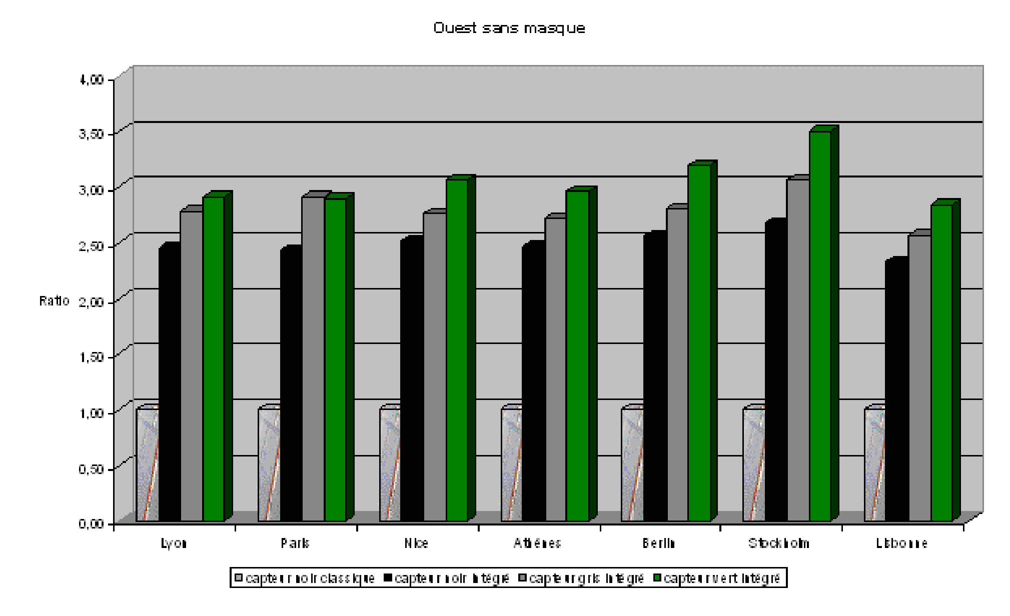


Figure C-1-77 : Coefficients de multiplication de la surface de captage pour une orientation Ouest (az=90°) sans masque.

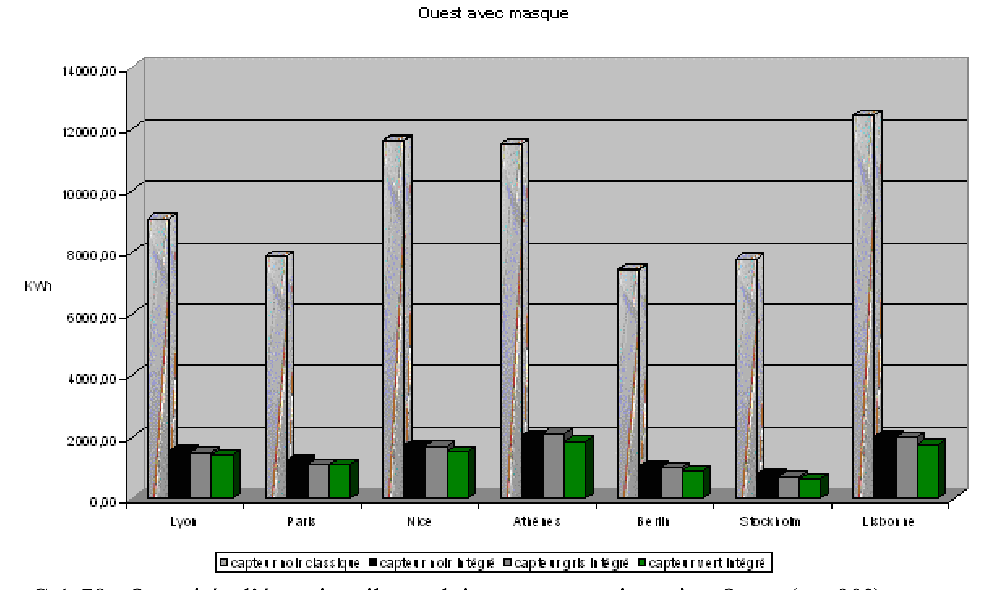


Figure C-1-78 : Quantités d'énergie utile produite pour une orientation Ouest (az=90°) avec masque.

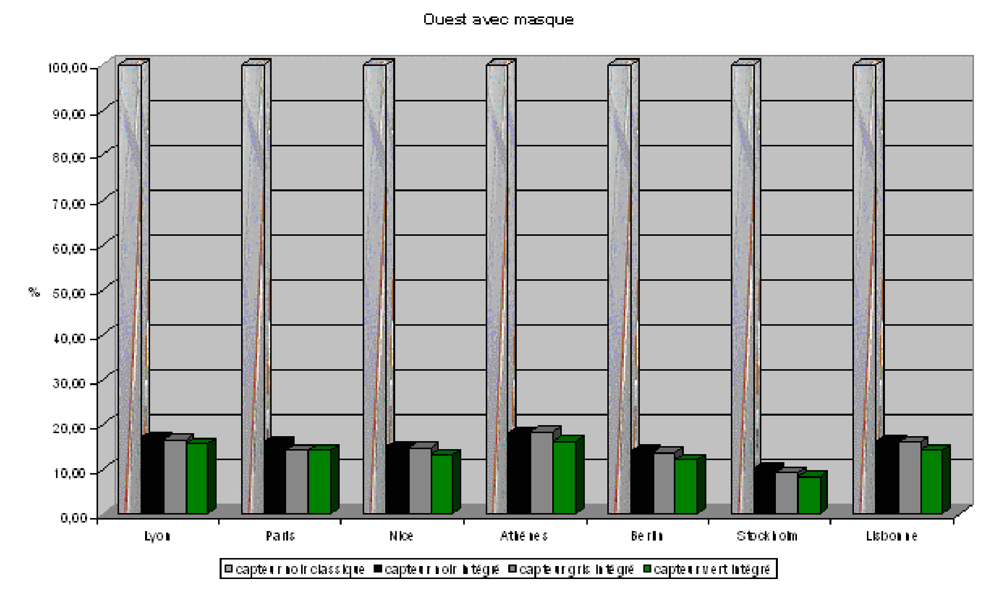


Figure C-1-79 : Pourcentages d'énergie utile produite pour une orientation Ouest (az=90°) avec masque par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

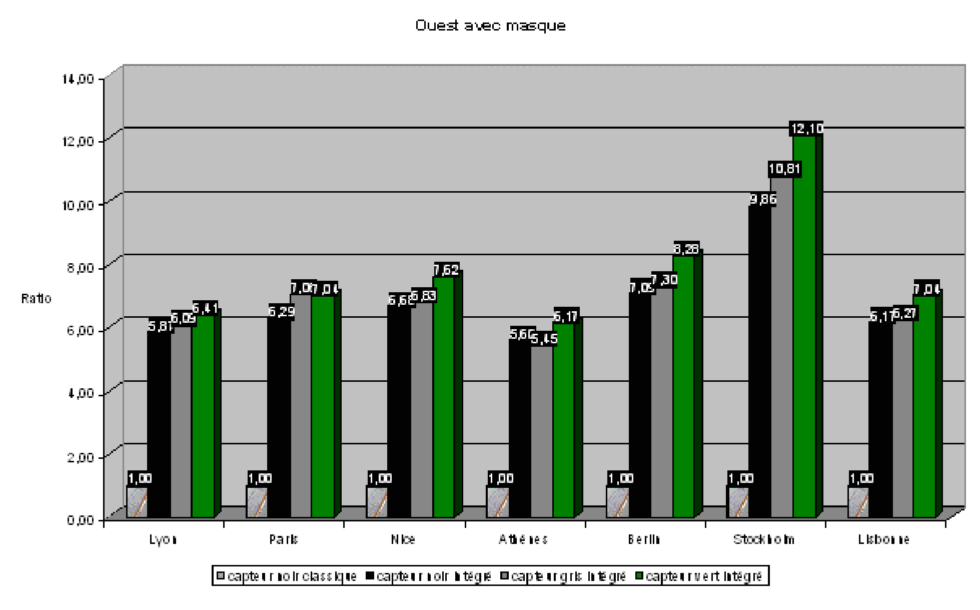


Figure C-1-80 : Coefficients de multiplication de la surface de captage pour une orientation Ouest (az=90°) avec masque.

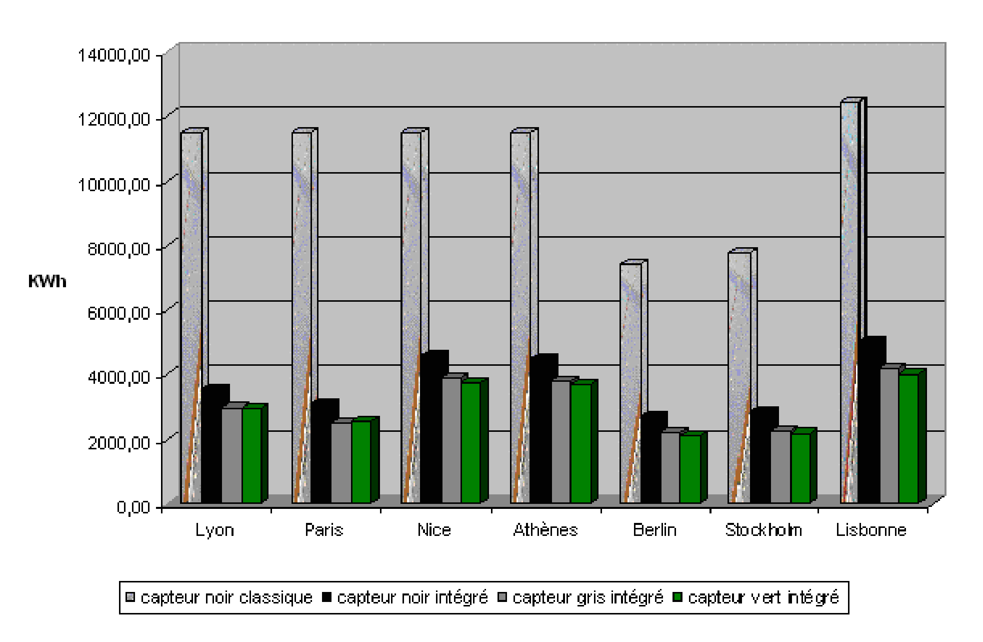


Figure C-1-81 : Quantités d'énergie utile produite pour une orientation Est (az=270°) sans masque.

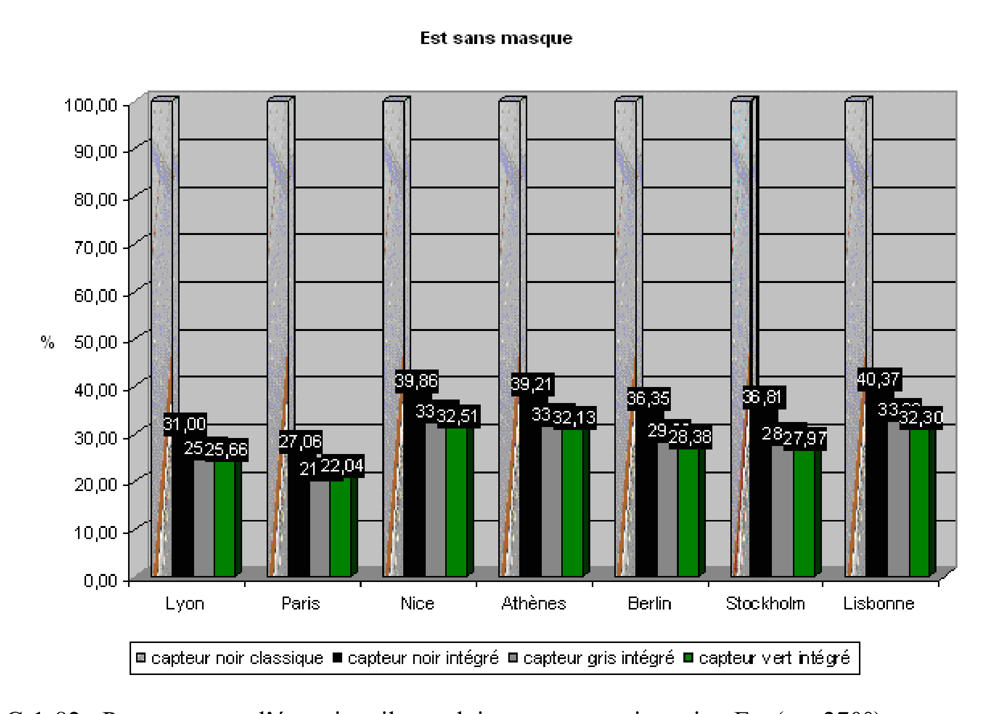


Figure C-1-82 : Pourcentages d'énergie utile produite pour une orientation Est (az=270°) sans masque par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

Figure C-1-83 : Coefficients de multiplication de la surface de captage pour une orientation Est (az=270°) sans masque.

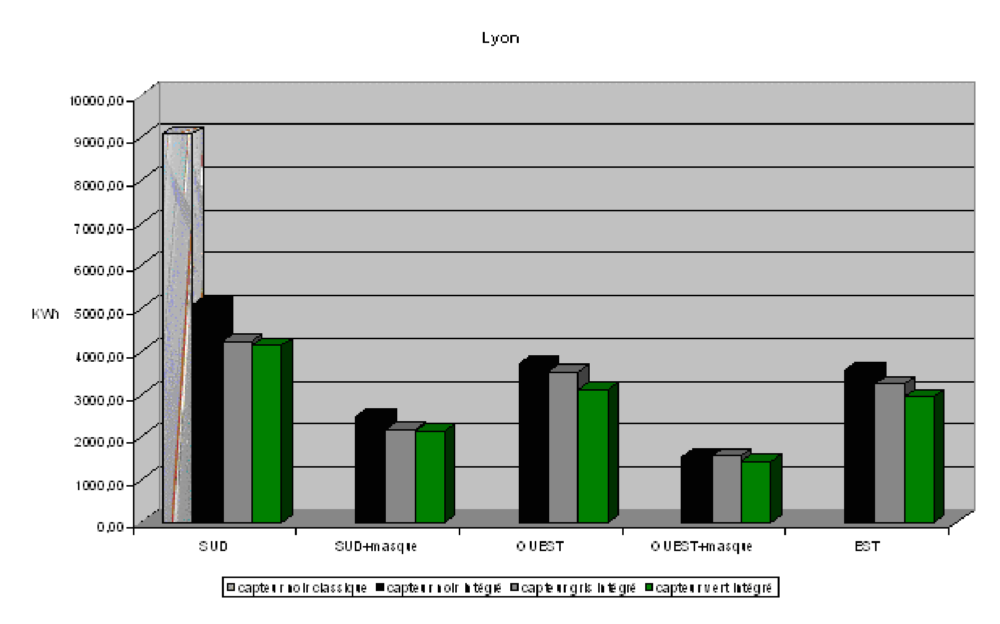


Figure C-1-84 : Quantités d'énergie utile produite à Lyon avec différentes configurations.

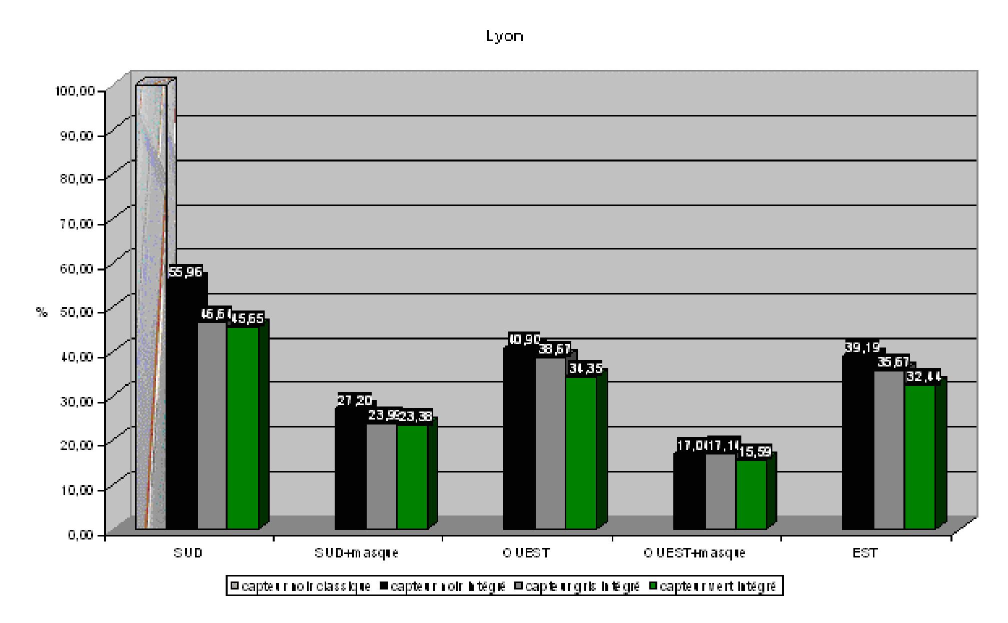


Figure C-1-85 : Pourcentages d'énergie utile produite à Lyon avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

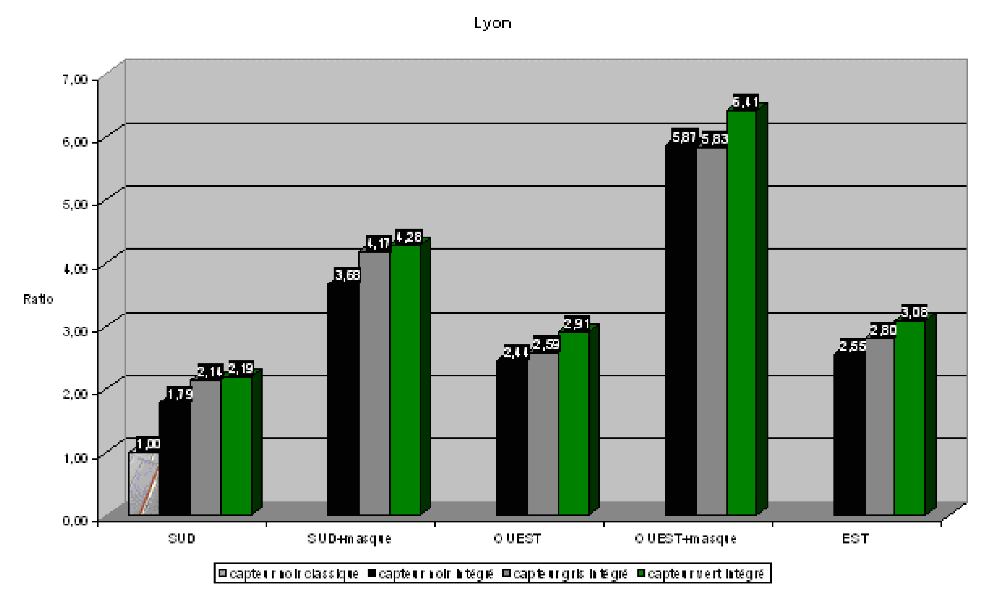


Figure C-1-86 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Lyon avec différentes configurations.

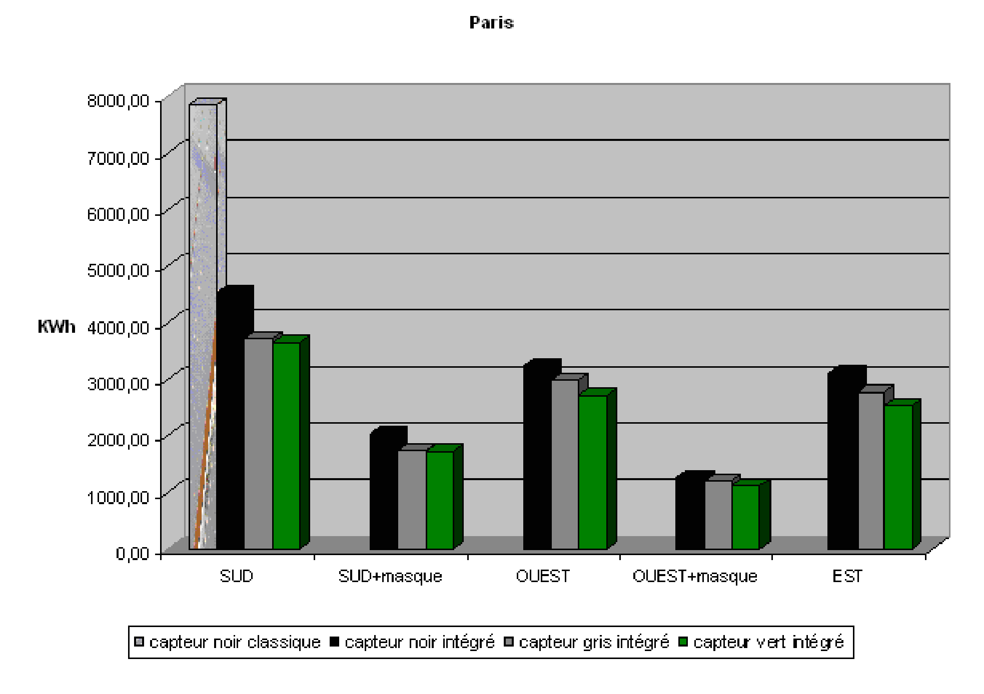


Figure C-1-87 : Quantités d'énergie utile produite à Paris avec différentes configurations.

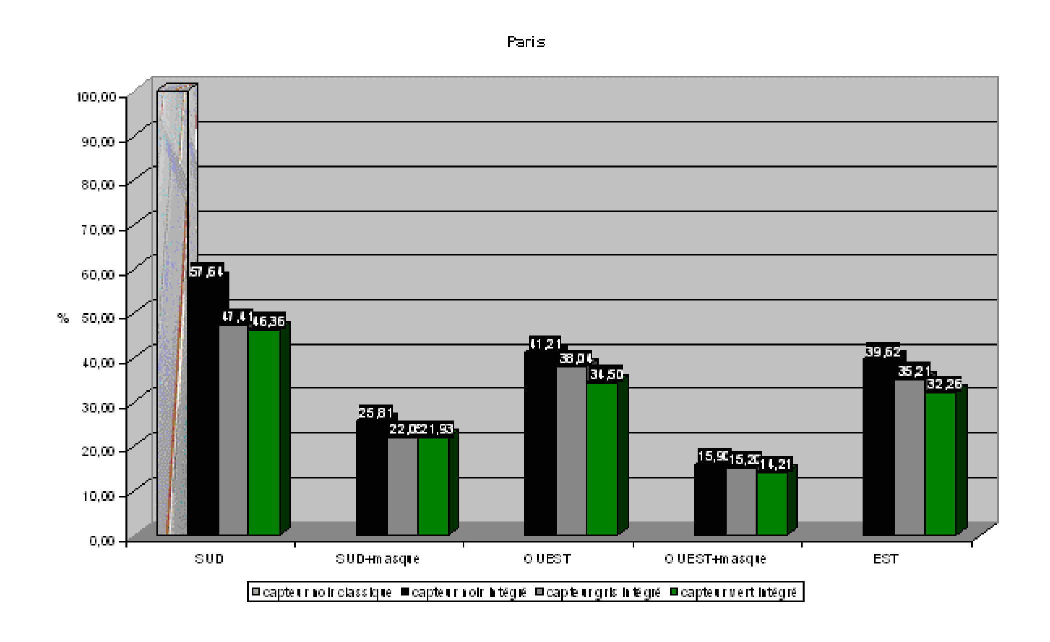


Figure C-1-88 : Pourcentages d'énergie utile produite à Paris avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

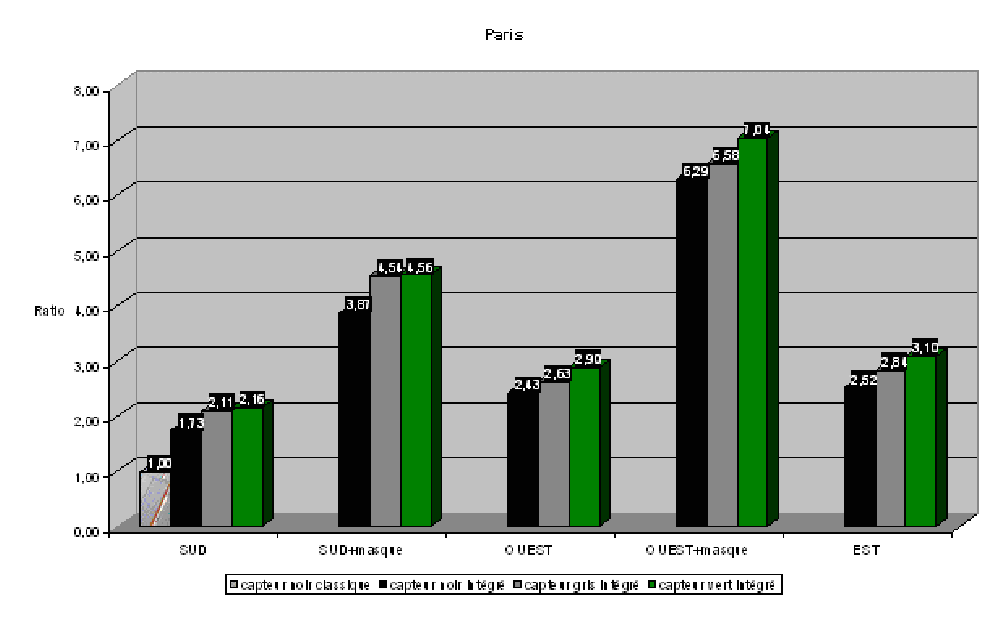


Figure C-1-89 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Paris avec différentes configurations.

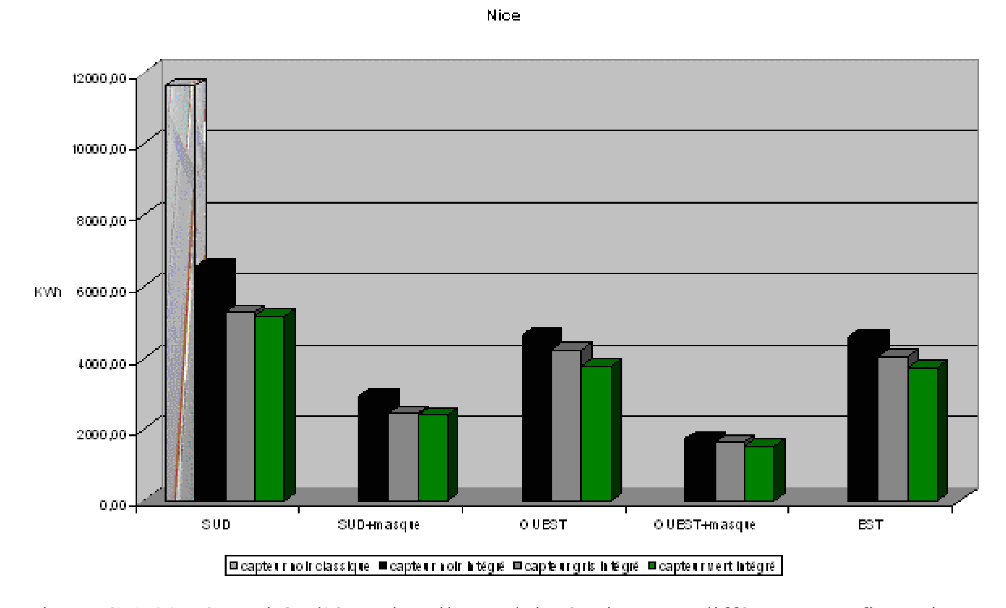


Figure C-1-90 : Quantités d’énergie utile produite à Nice avec différentes configurations.

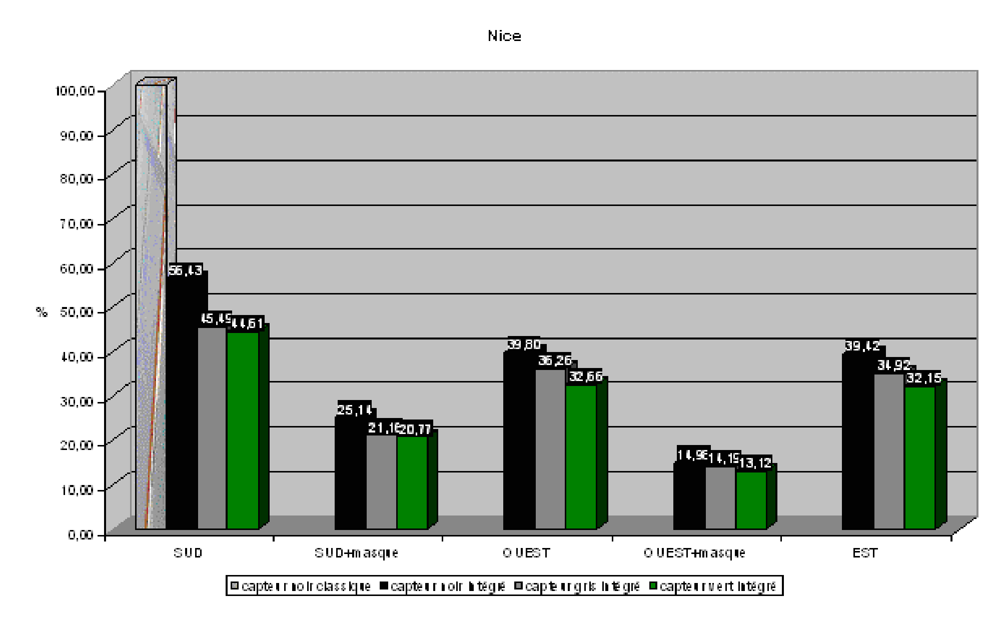


Figure C-1-91 : Pourcentages d'énergie utile produite à Nice avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

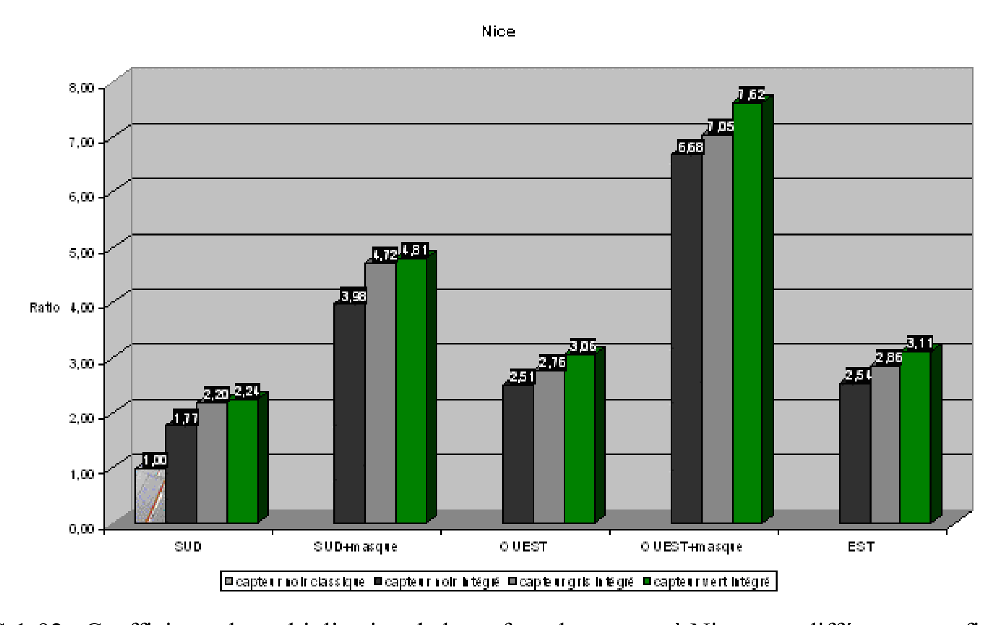


Figure C-1-92 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Nice avec différentes configurations.

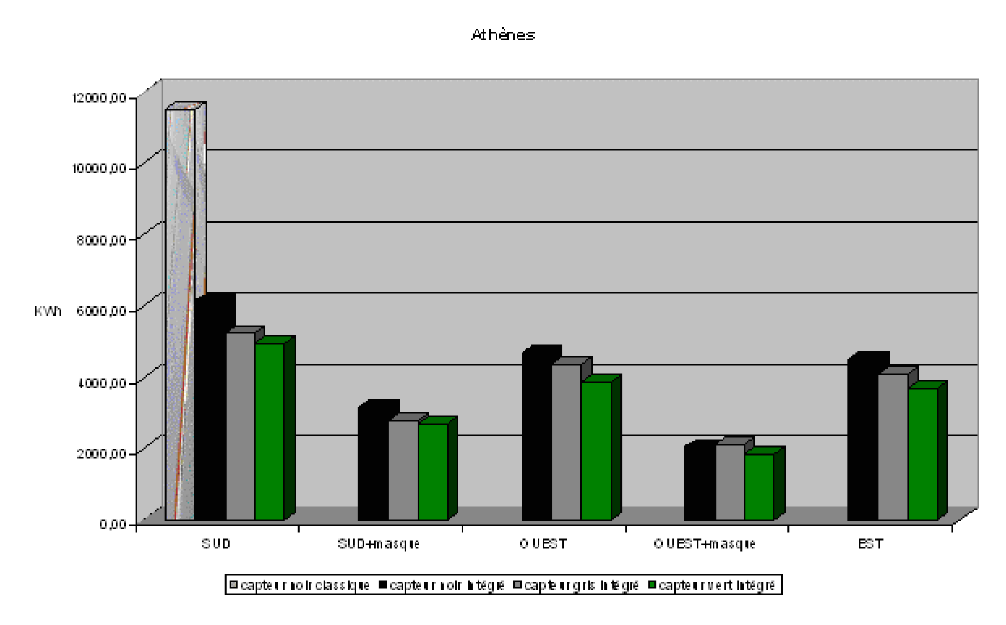


Figure C-1-93 : Quantités d'énergie utile produite à Athènes avec différentes configurations.

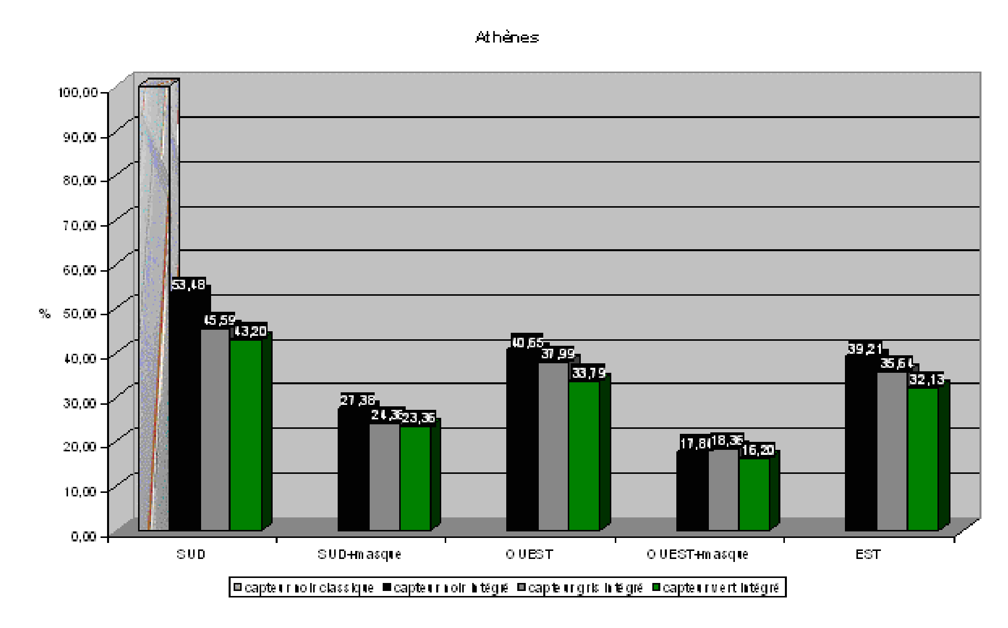


Figure C-1-94 : Pourcentages d'énergie utile produite à Athènes avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

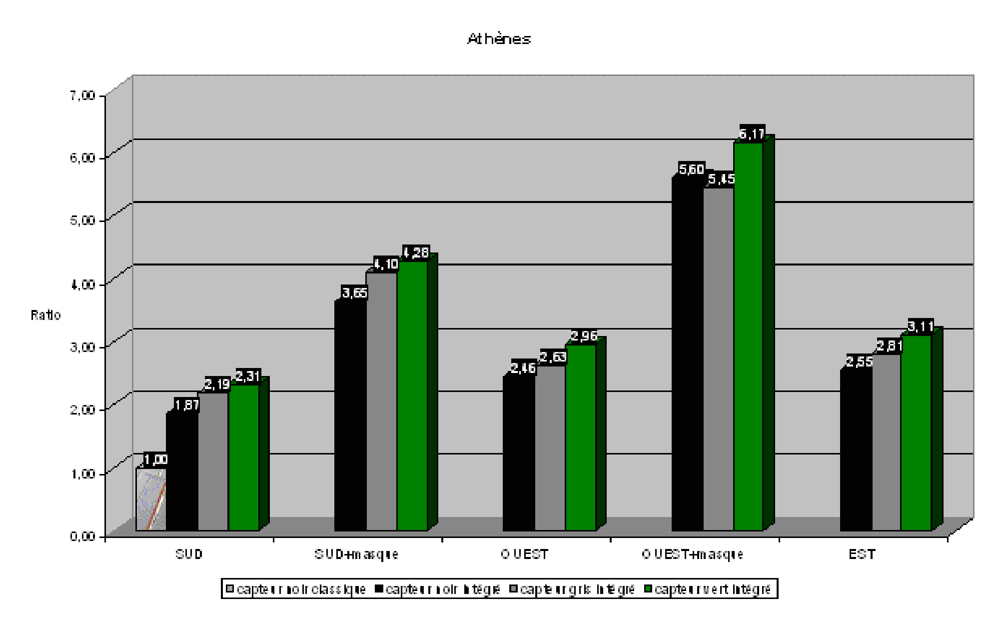


Figure C-1-95 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Athènes avec différentes configurations.

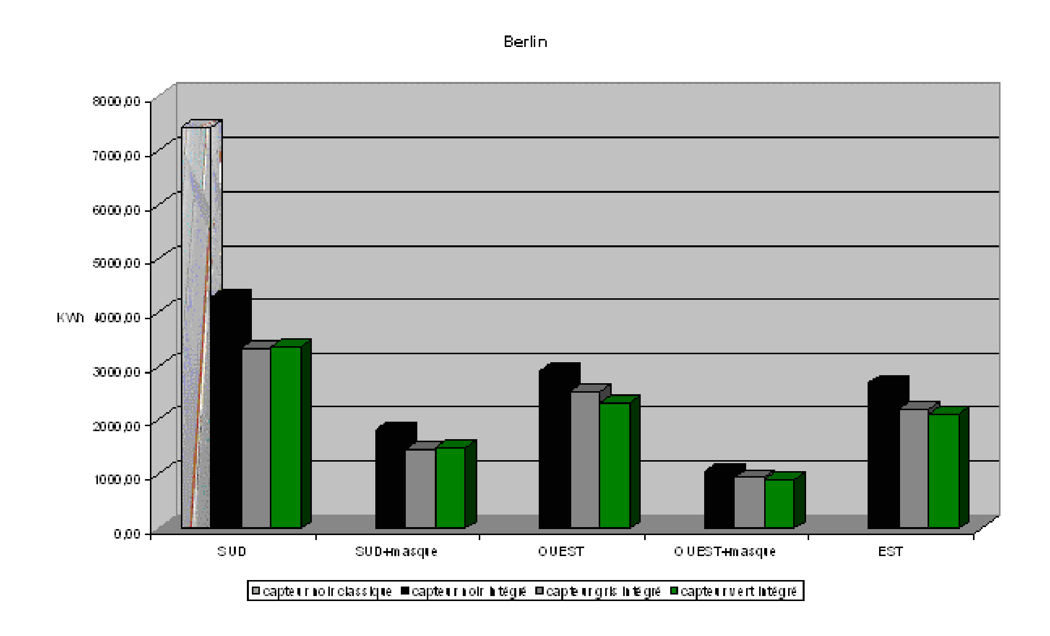


Figure C-1-96 : Quantités d’énergie utile produite à Berlin avec différentes configurations.

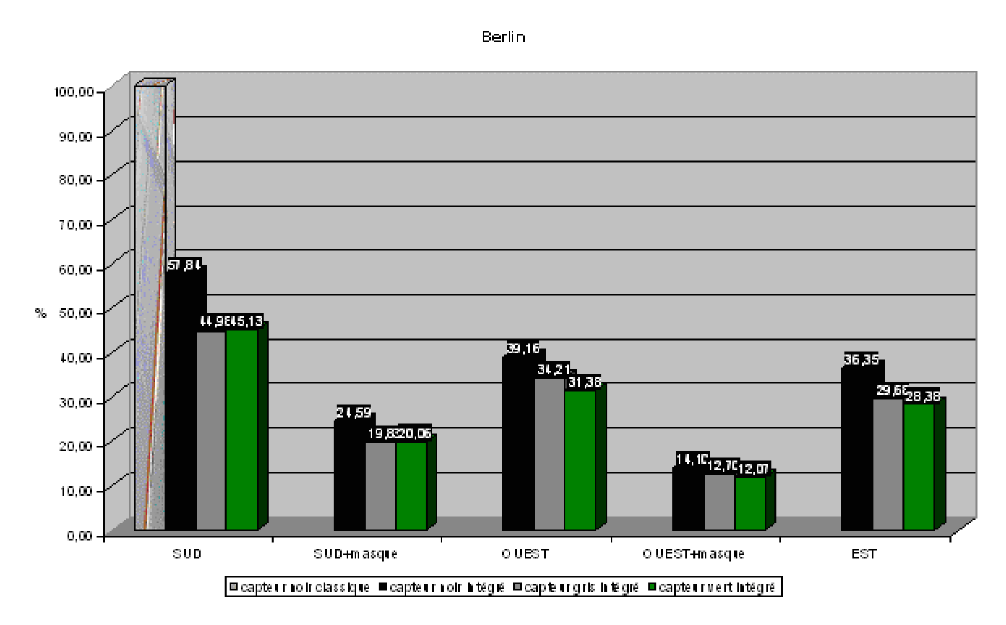


Figure C-1-97 : Pourcentages d'énergie utile produite à Berlin avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

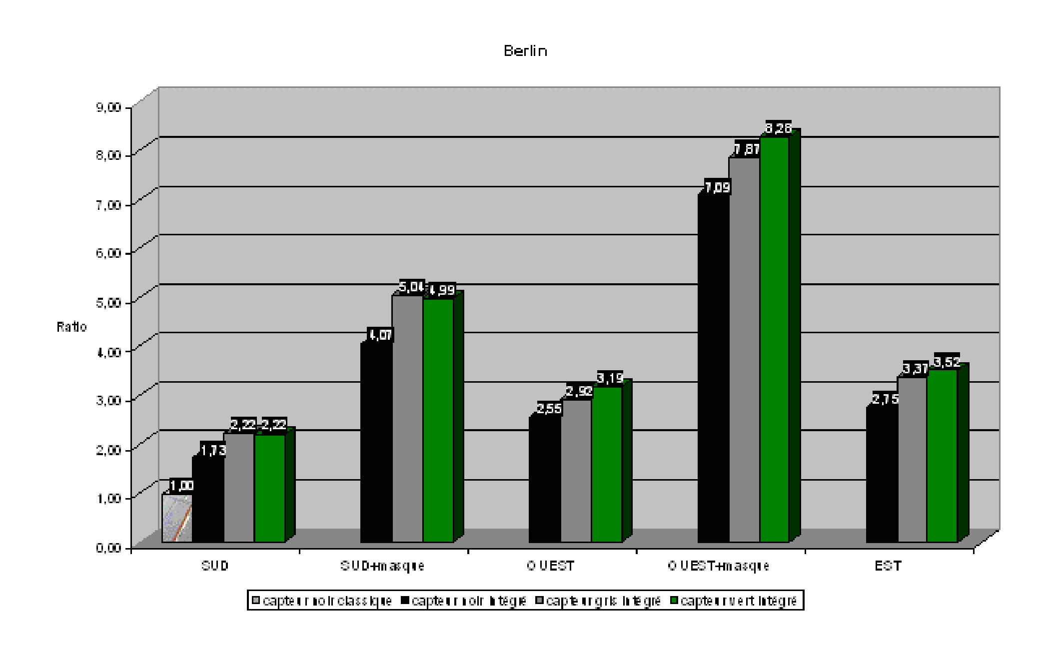


Figure C-1-98 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Berlin avec différentes configurations.

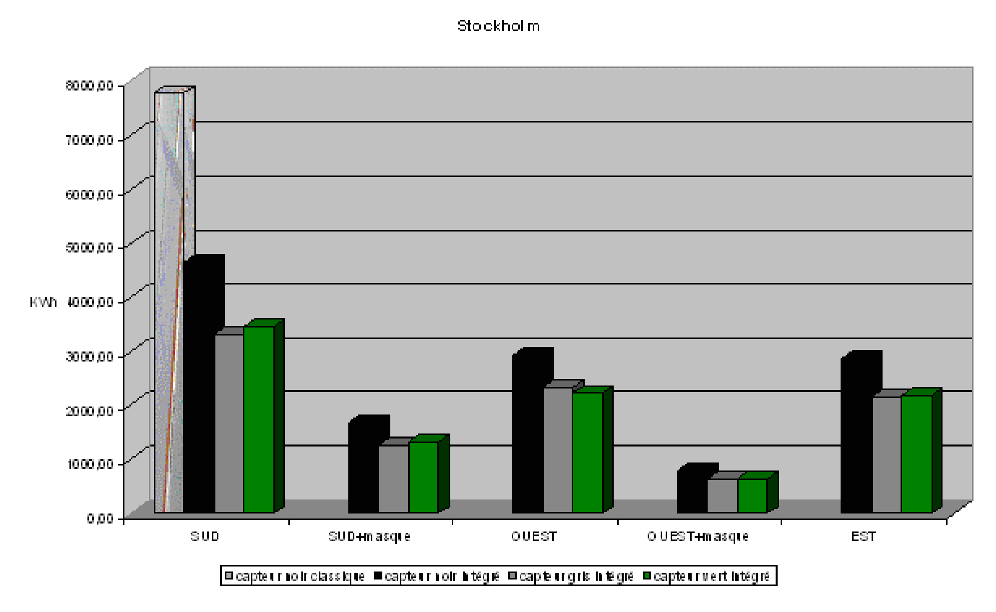


Figure C-1-99 : Quantités d'énergie utile produite à Stockholm avec différentes configurations.

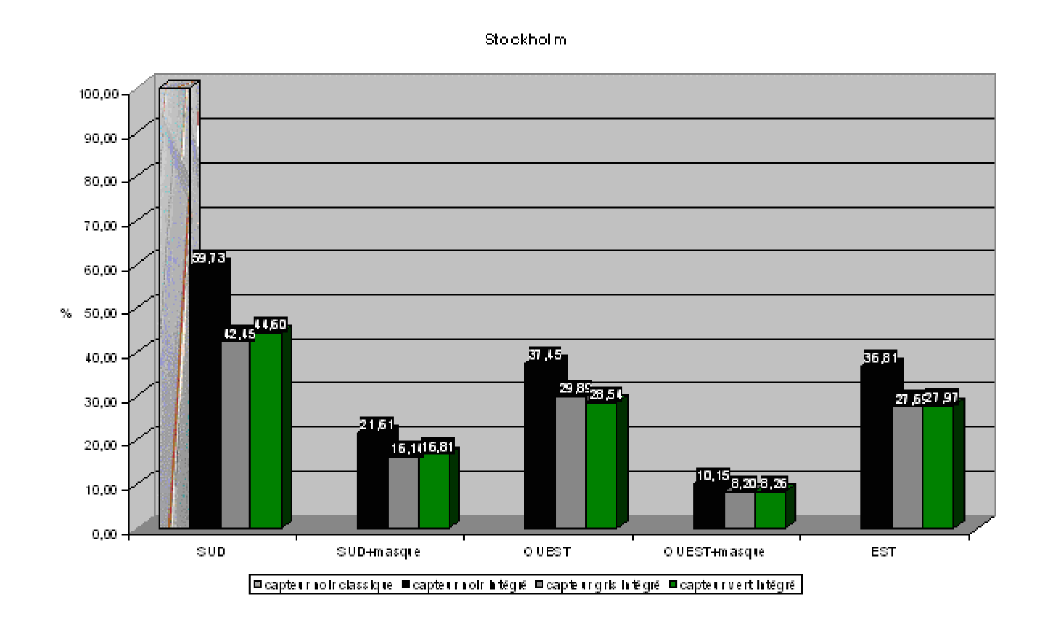


Figure C-1-100 : Pourcentages d'énergie utile produite à Stockholm avec différentes configurations par rapport à l'énergie utile produite par le système référence.

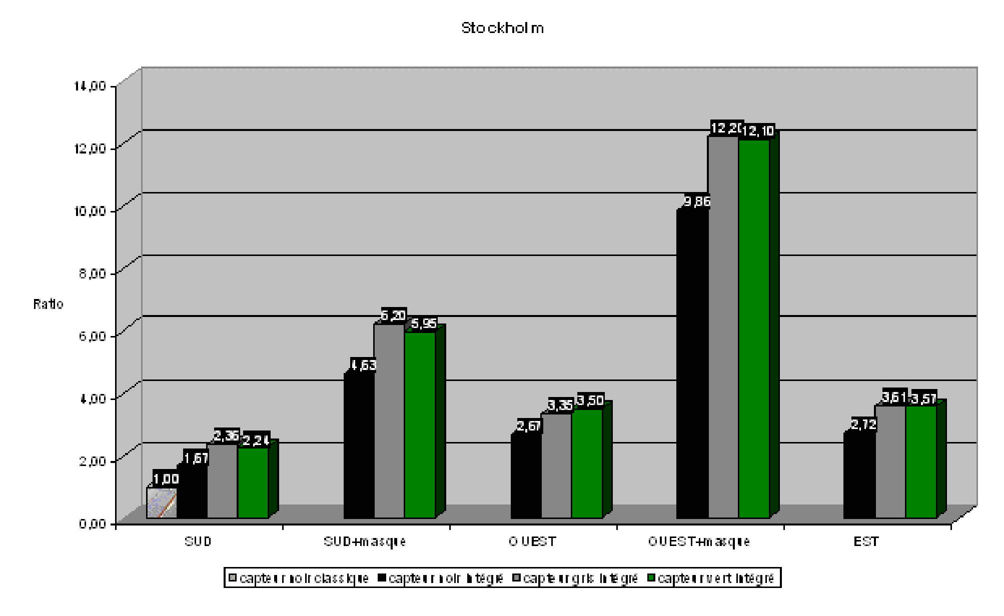


Figure C-1-101 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Stockholm avec différentes configurations.

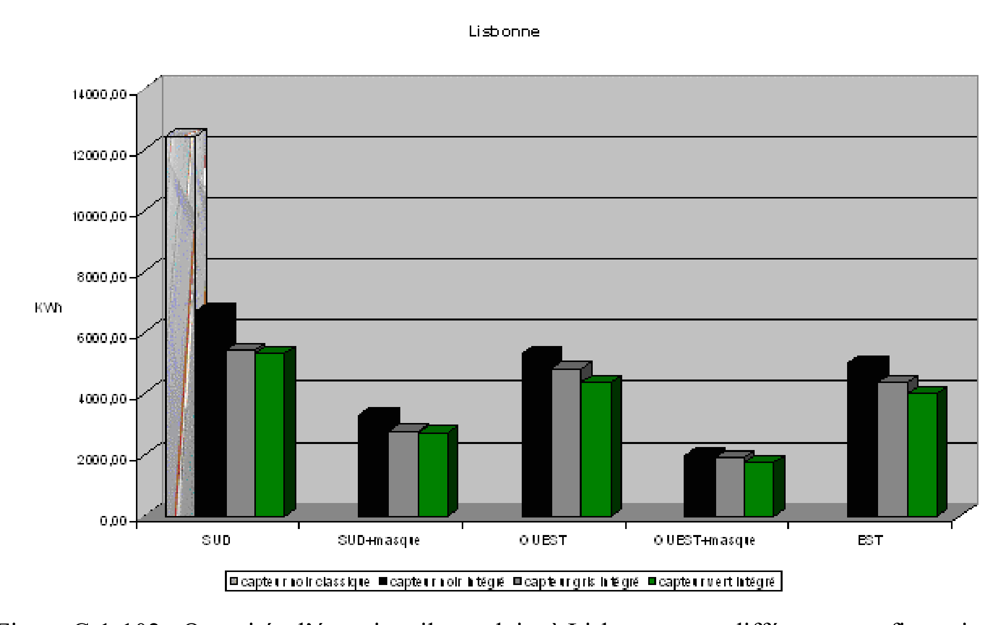


Figure C-1-102 : Quantités d'énergie utile produite à Lisbonne avec différentes configurations.

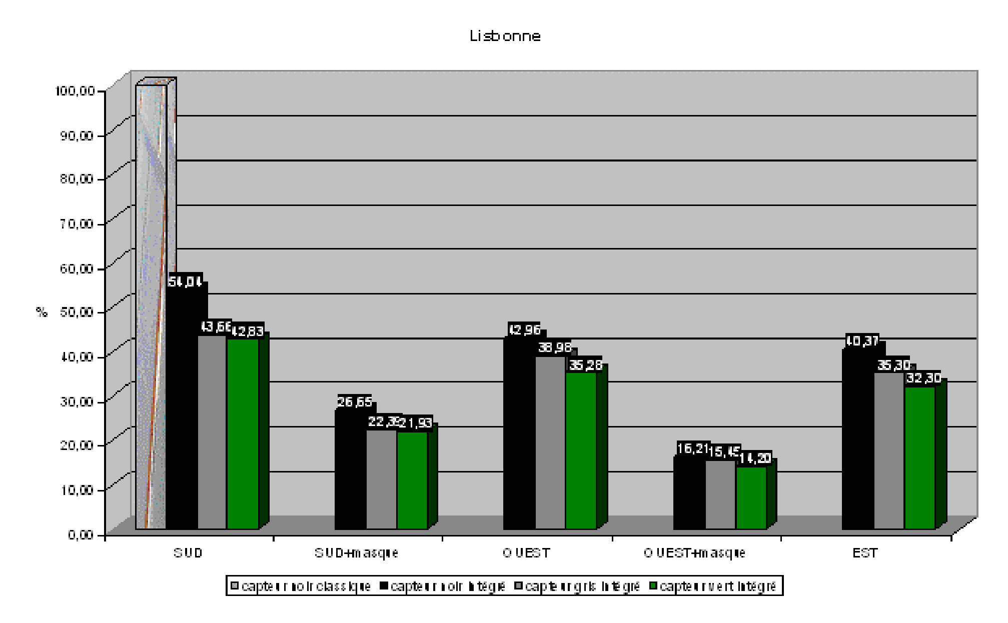


Figure C-1-103 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Lisbonne avec différentes configurations

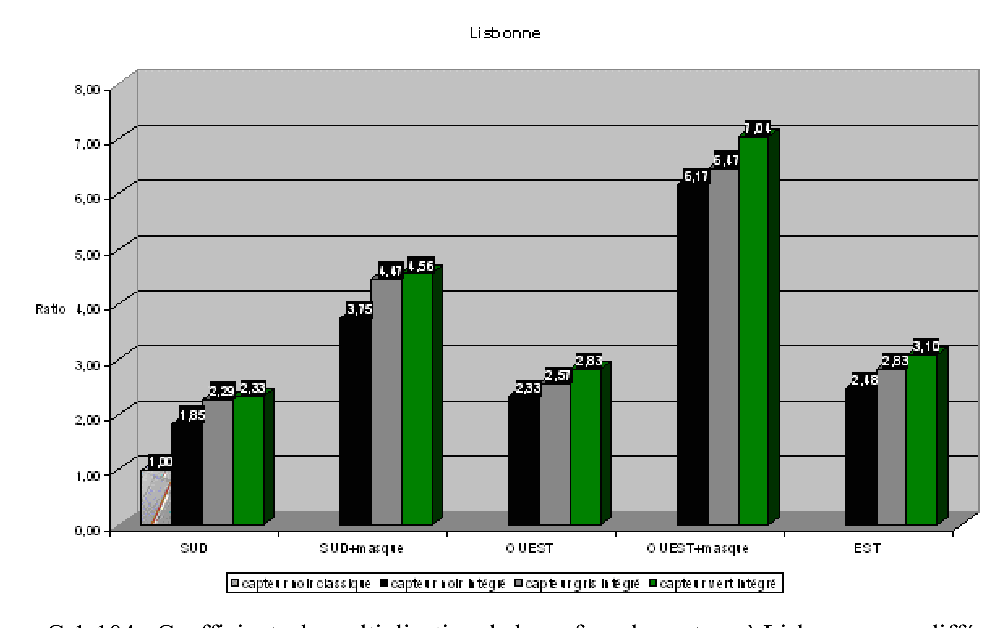


Figure C-1-104 : Coefficients de multiplication de la surface de captage à Lisbonne avec différentes configurations.

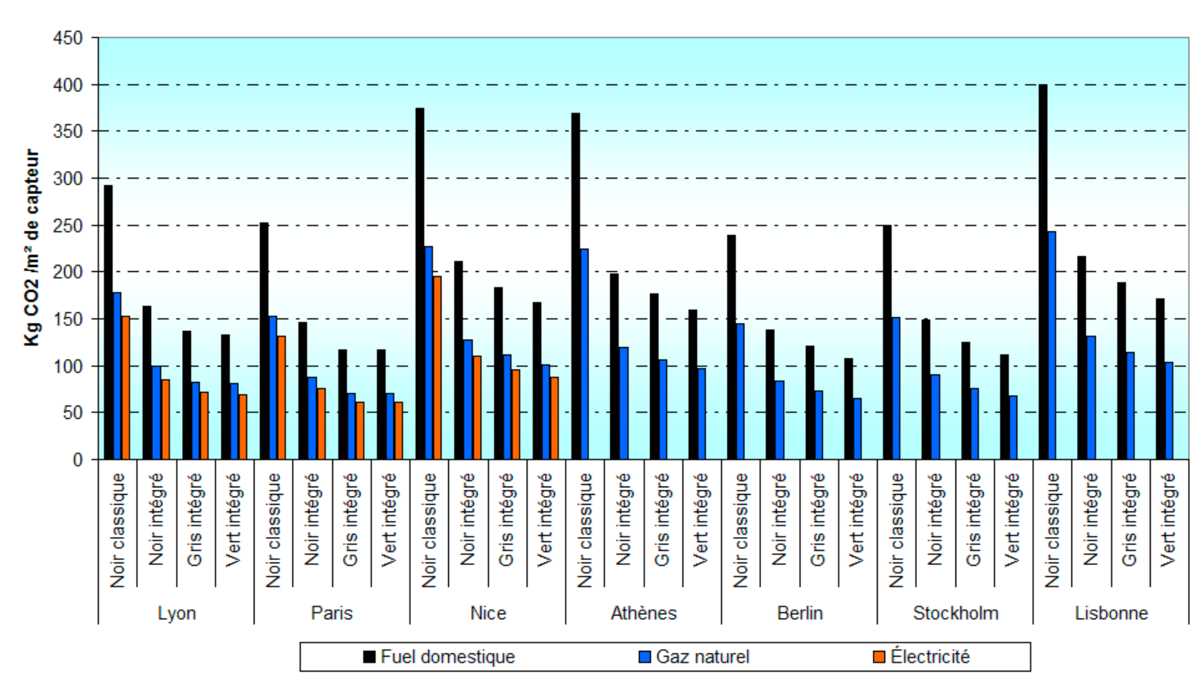


Figure C-1-105 : Poids de CO_2 évité par le système solaire suivant l'énergie de substitution dans chaque ville.

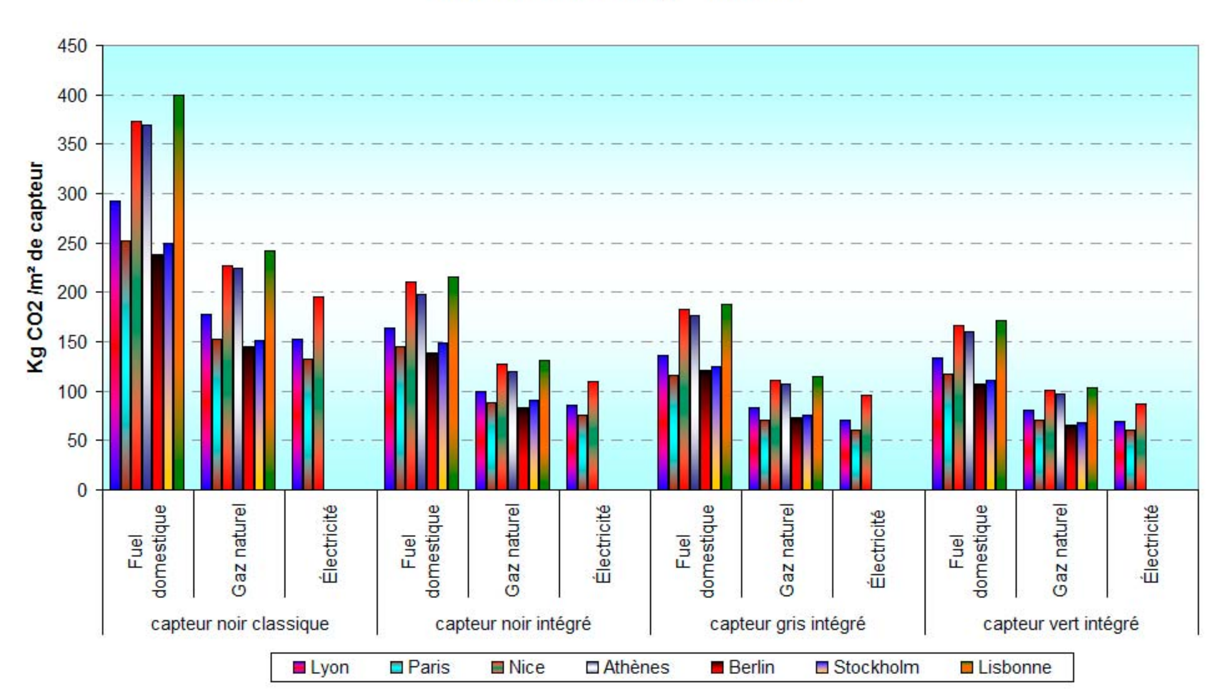


Figure C-1-106 : Poids de CO_2 évité par chaque système solaire suivant l'énergie de substitution.

C.2 Résultats des mesures

Dans ce qui suit seront présentées les résultats des mesures expérimentales des trois capteurs prototypes installés dans la façade du bâtiments des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau.

C.2.1 Résultats de mesures du capteur « Noir » du 13 au 18juillet 2005

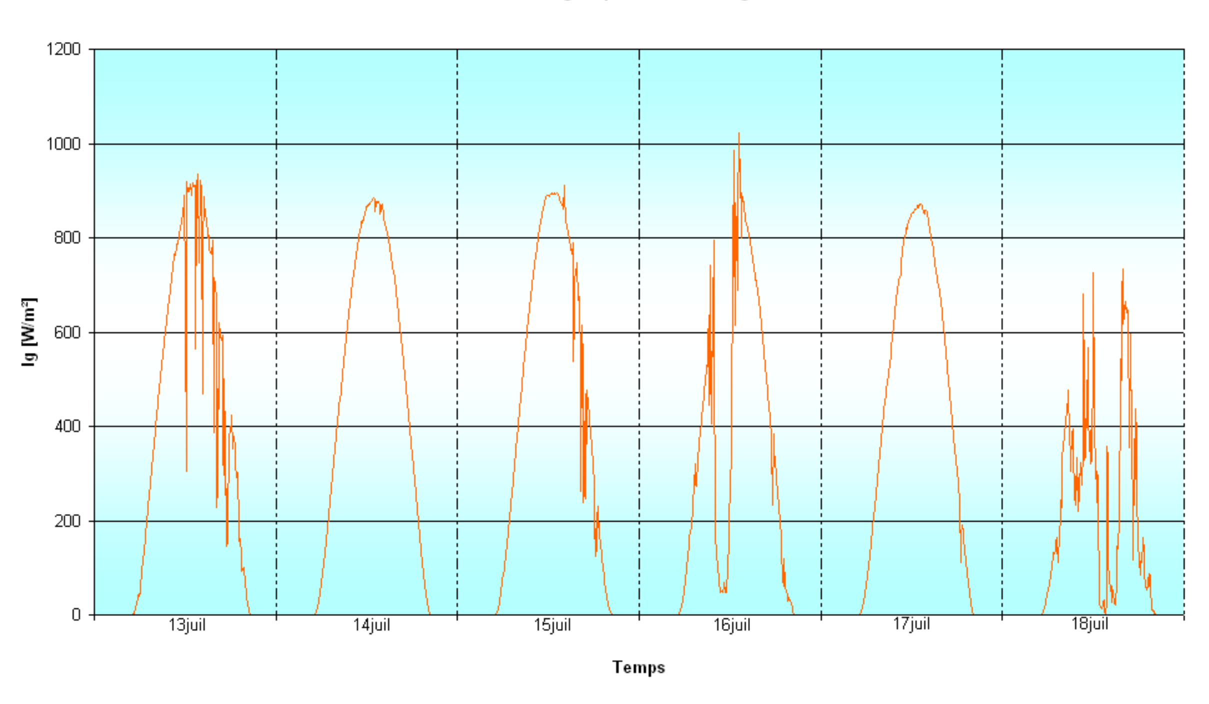


Figure C-2-1 : Eclairement énergétique horizontal global du 13 au 18 juillet aux GAIA.

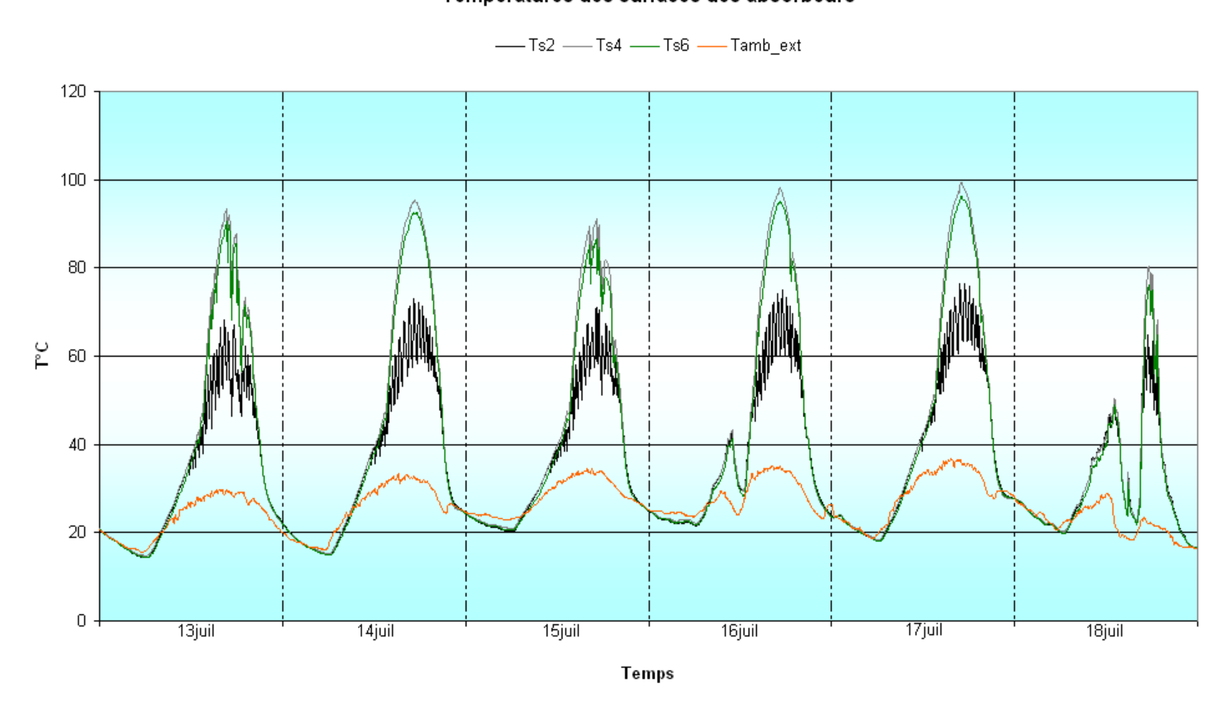


Figure C-2-2 : Evolution des températures des absorbeurs du 13 au 18 juillet.

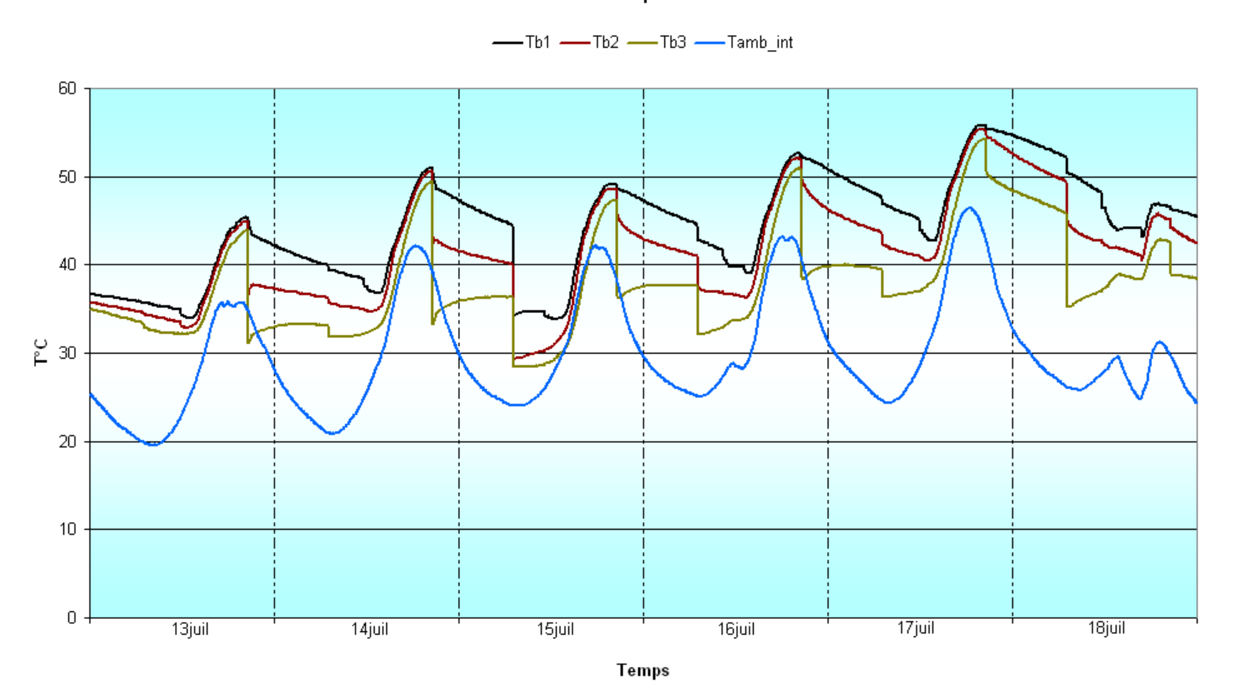


Figure C-2-3 : Evolution de la température du ballon de stockage du 13 au 18 juillet.

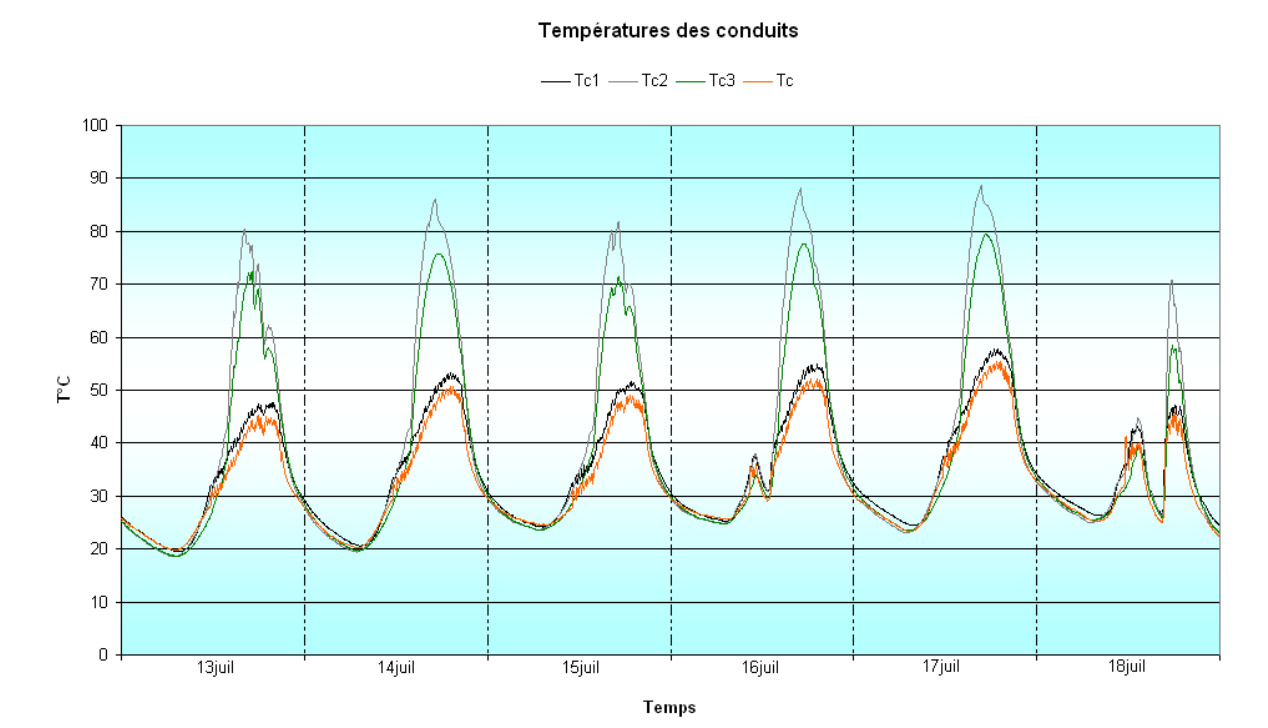


Figure C-2-4 : Evolution des températures dans les conduits du 13 au 18 juillet.

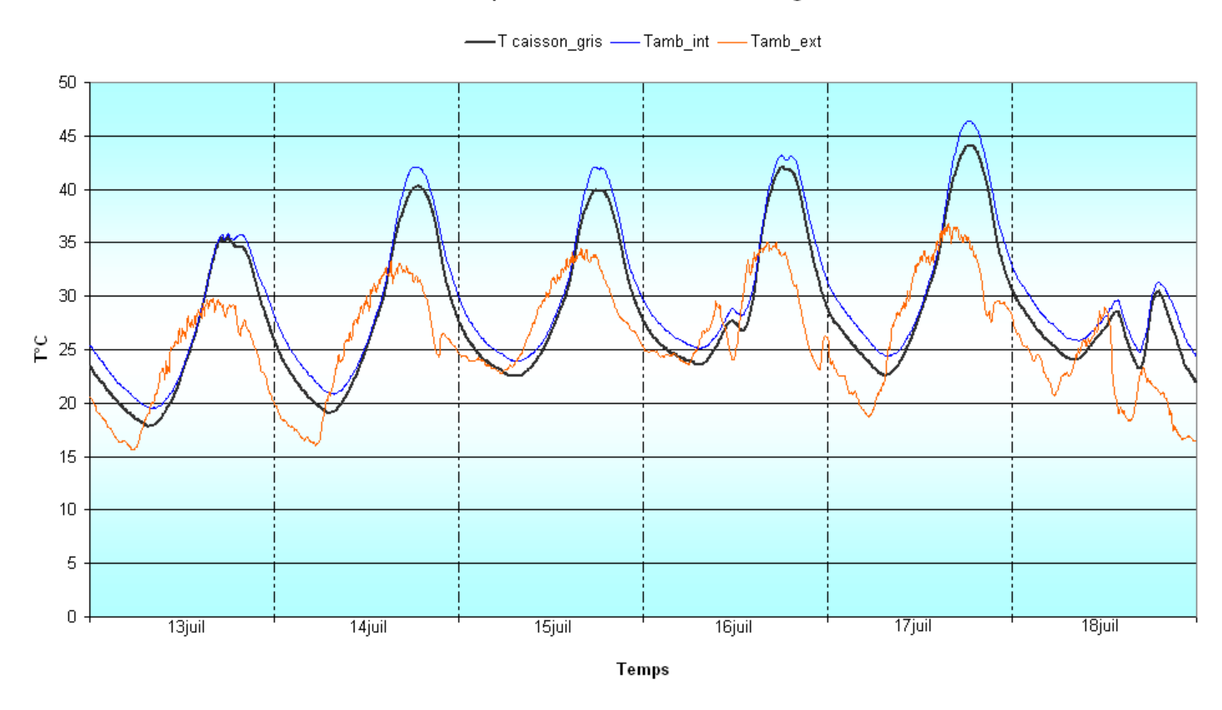


Figure C-2-5 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 13 au 18 juillet.

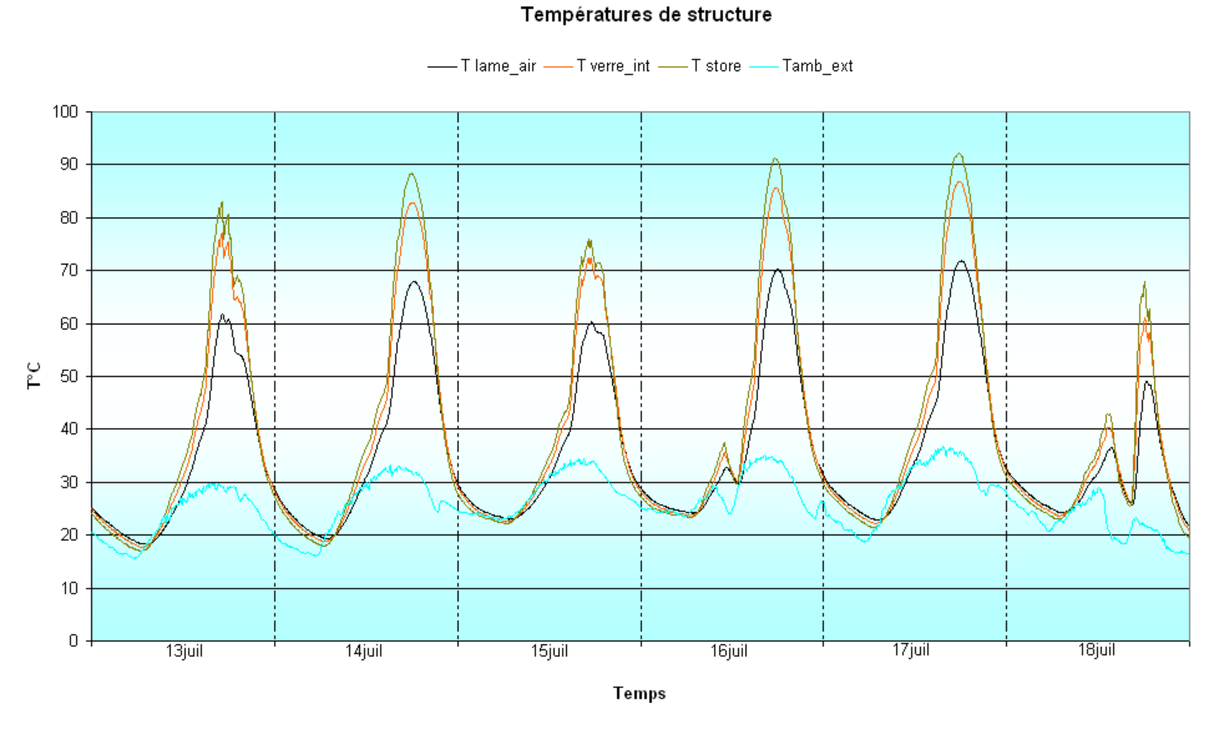


Figure C-2-6 : Evolution des températures de la structure de capteur du 13 au 18 juillet.

C.2.2 Résultats de mesures du capteur « Gris » du 20 au 24 juillet 2005

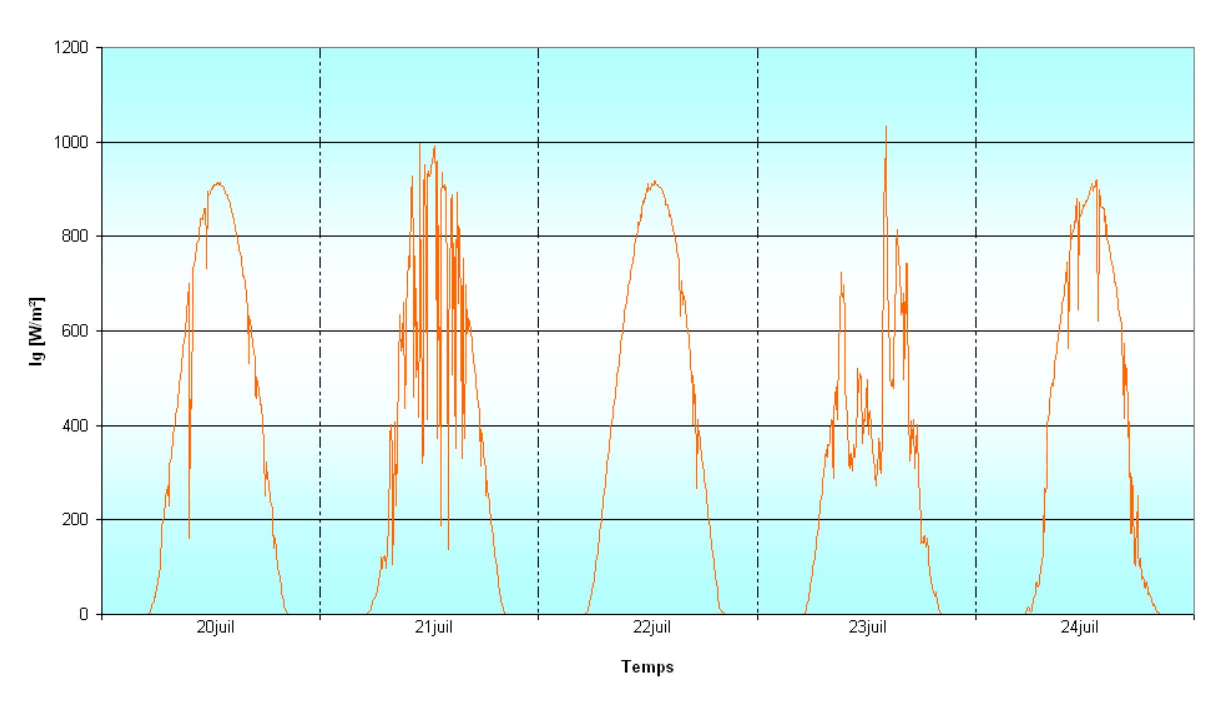


Figure C-2-7 : Eclairement énergétique horizontal global du 20 au 24 juillet aux GAIA.

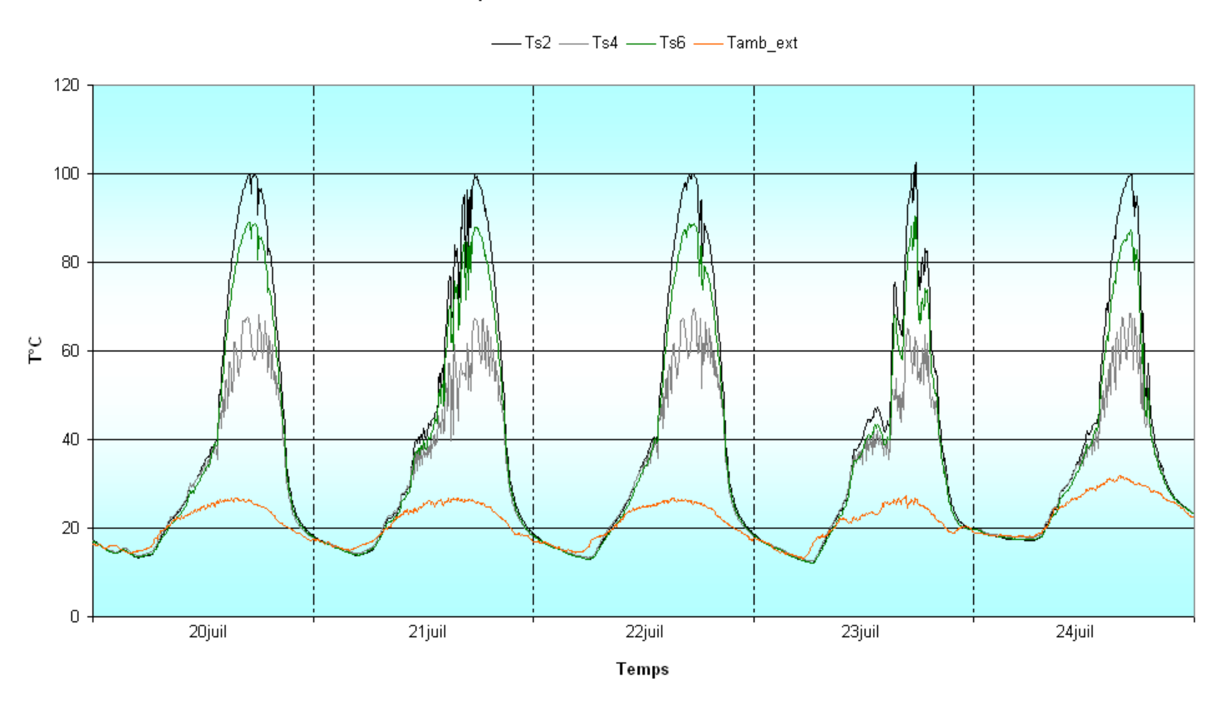


Figure C-2-8 : Evolution des températures des absorbeurs du 20 au 24 juillet.

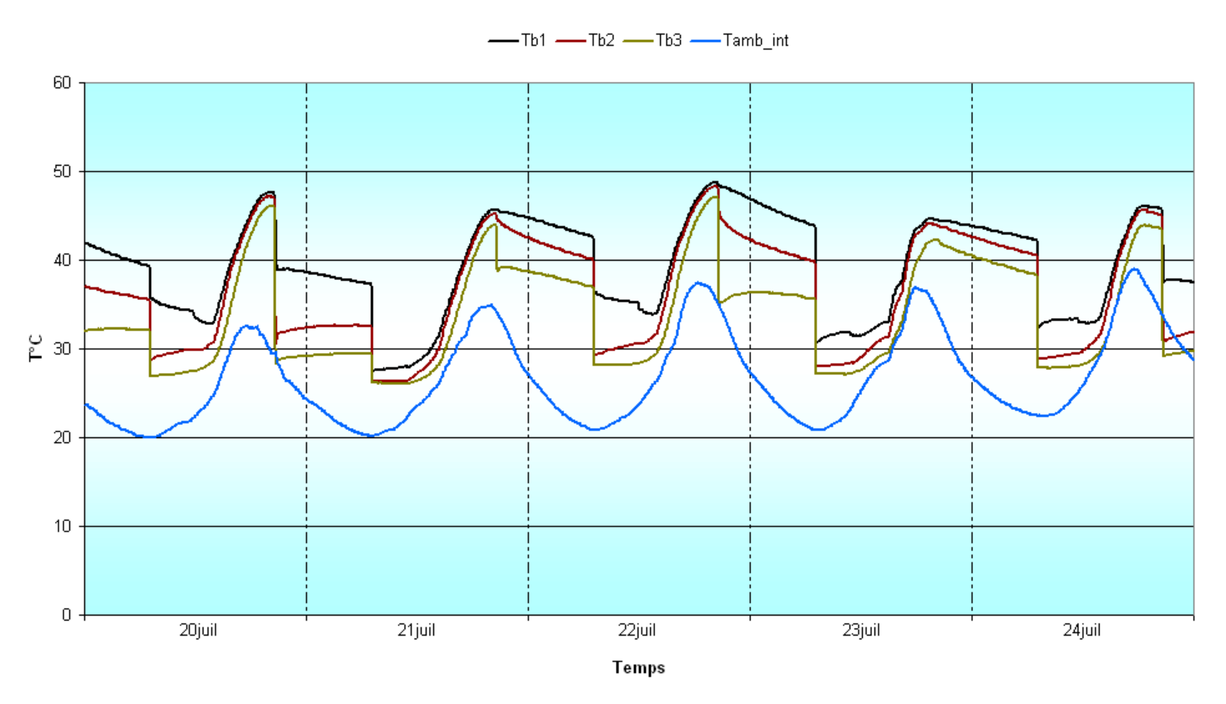
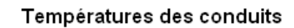


Figure C-2-9 : Evolution de la température du ballon de stockage du 20 au 24 juillet.



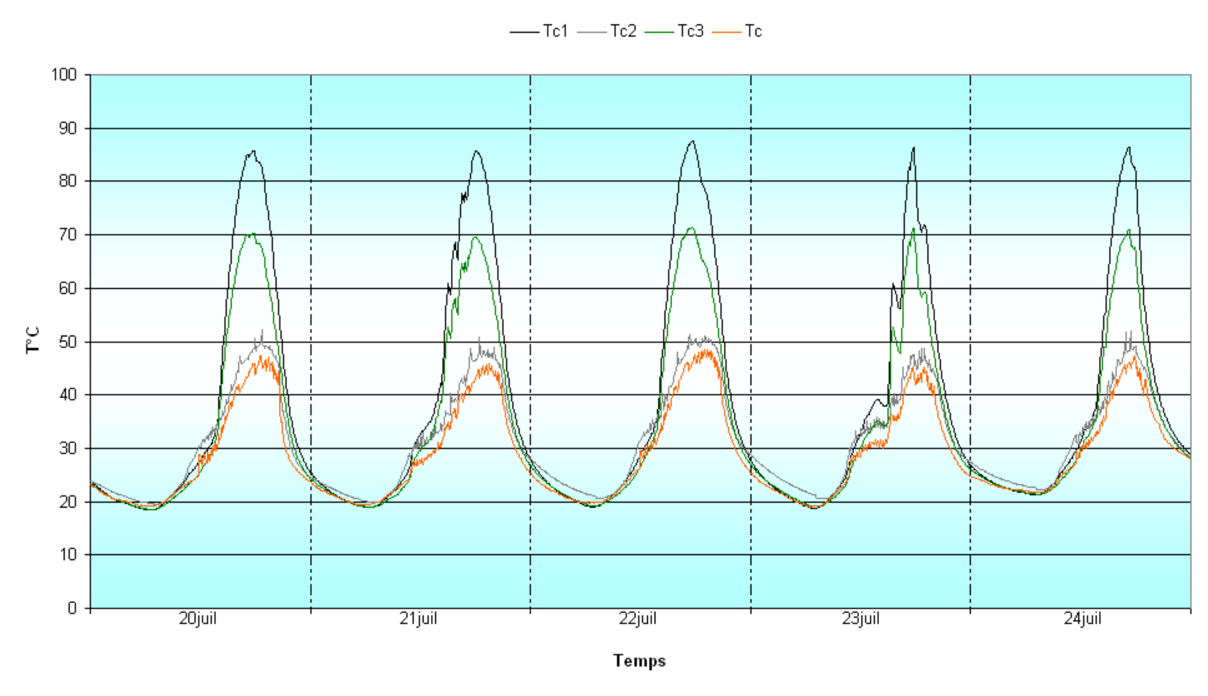


Figure C-2-10 : Evolution des températures dans les conduits du 20 au 24 juillet.

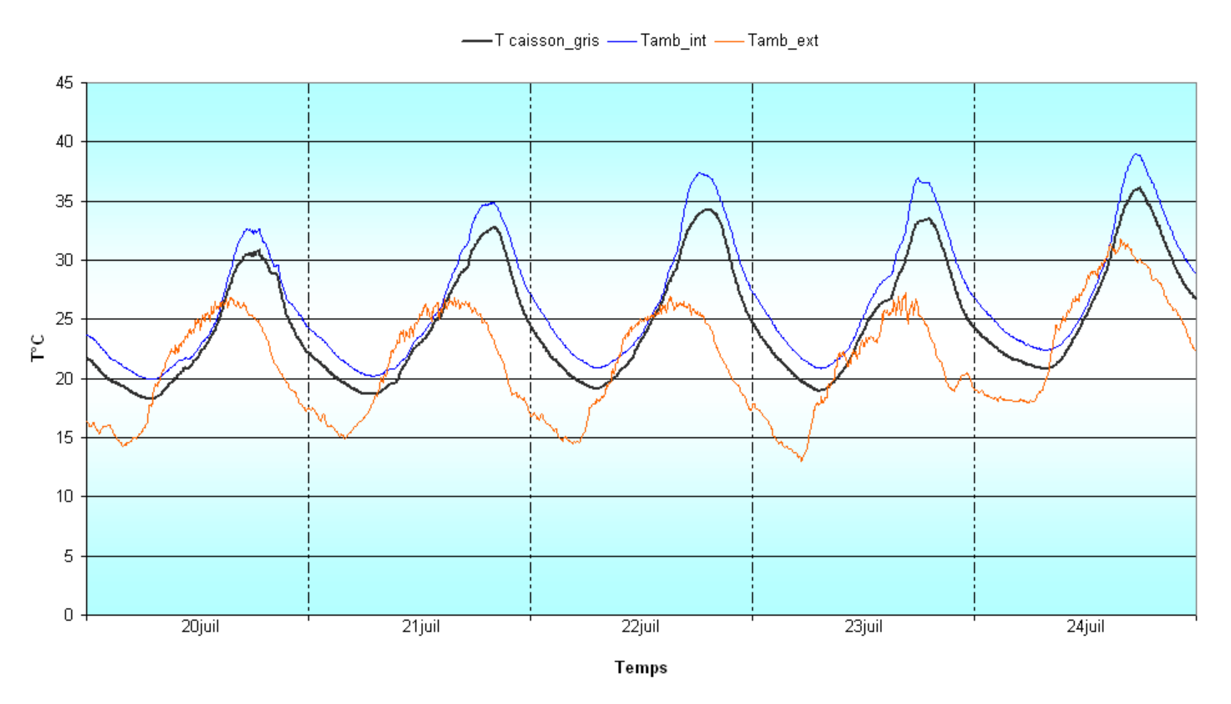


Figure C-2-11 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 20 au 24 juillet.

Températures de structure

T lame_air   T verre_int   T store   Tamb_ext

T°C

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90

20juil 21juil 22juil 23juil 24juil

Temps

Figure C-2-12 : Evolution des températures de la structure de capteur du 20 au 24 juillet.

C.2.3 Résultats de mesures du capteur « Vert » du 28 juillet au 02 août 2005



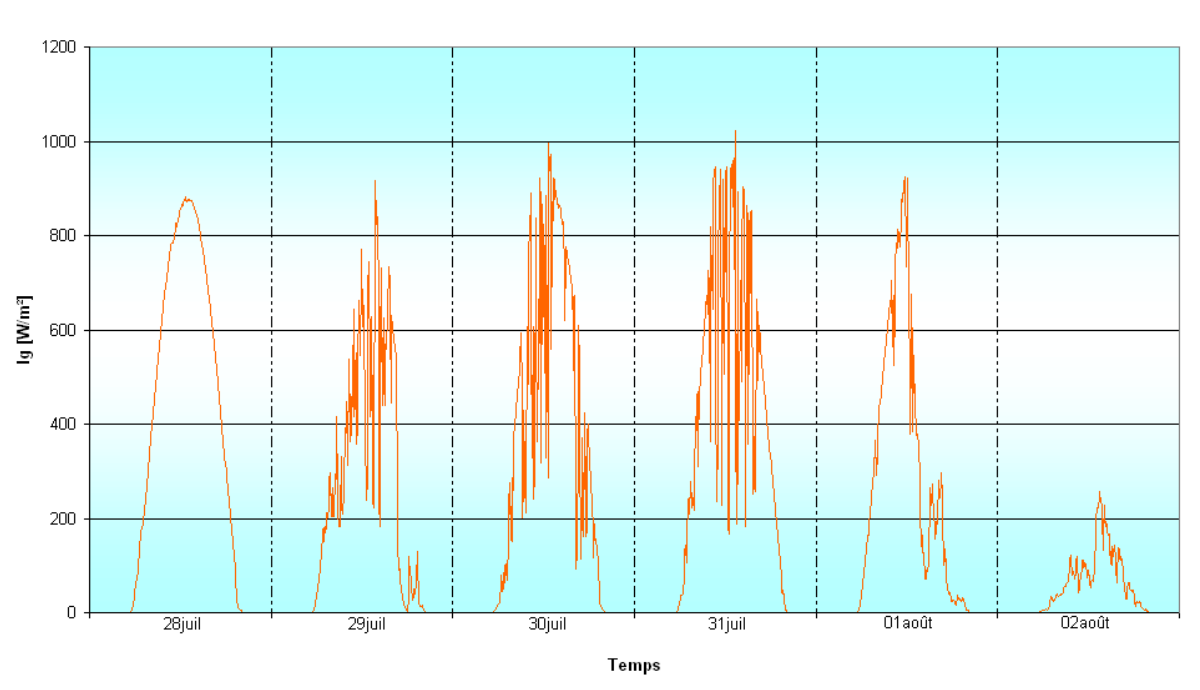


Figure C-2-13 : Eclairement énergétique horizontal global du 28 juillet au 02 août aux GAIA.

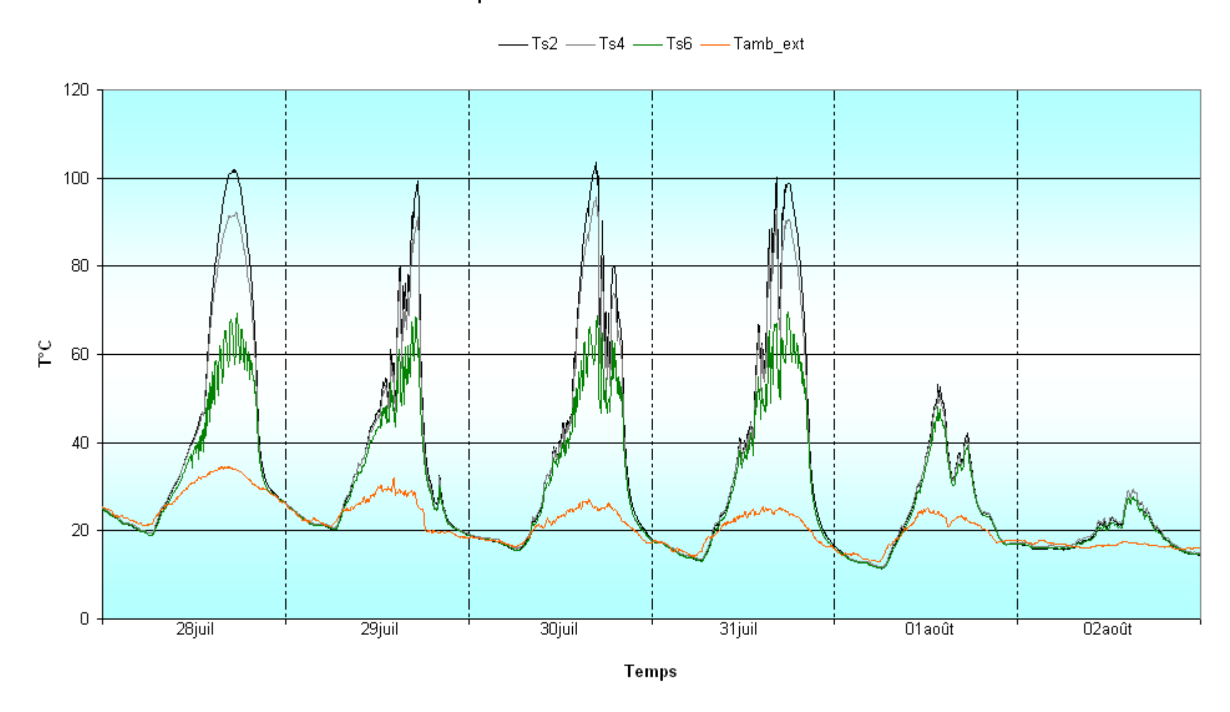


Figure C-2-14 : Evolution des températures des absorbeurs du 28 juillet au 02 août.

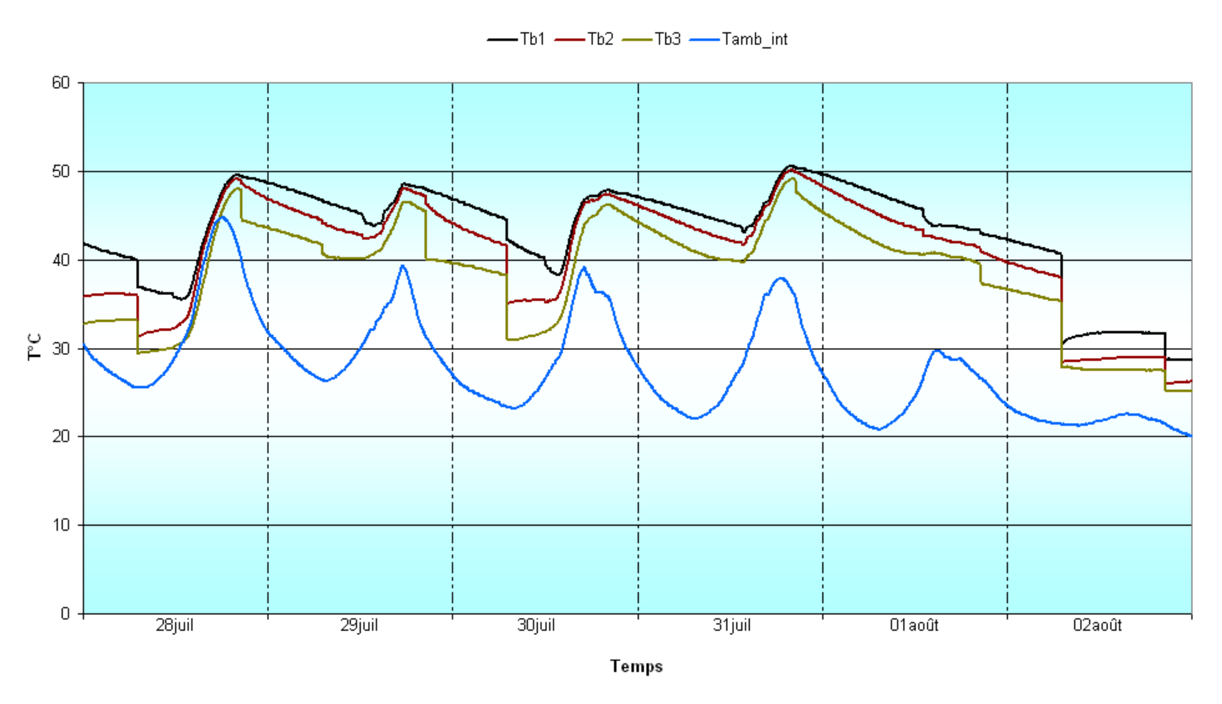


Figure C-2-15 : Evolution de la température du ballon de stockage du 28 juillet au 02 août.

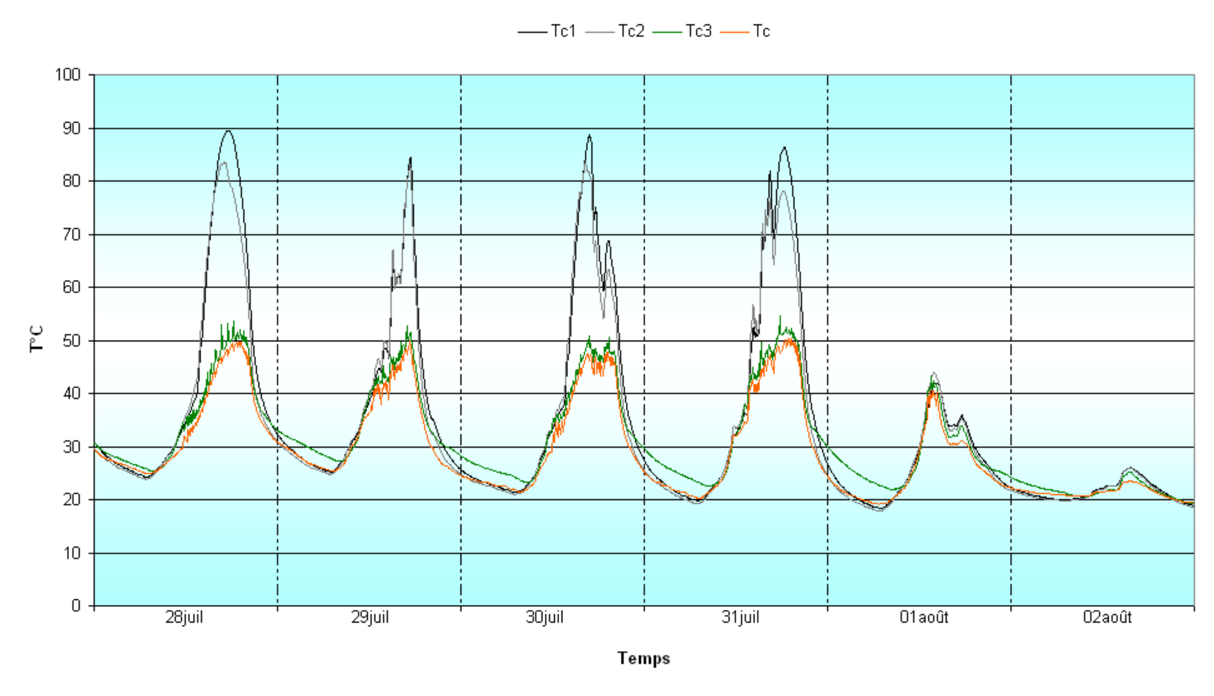


Figure C-2-16 : Evolution des températures dans les conduits du 28 juillet au 02 août.

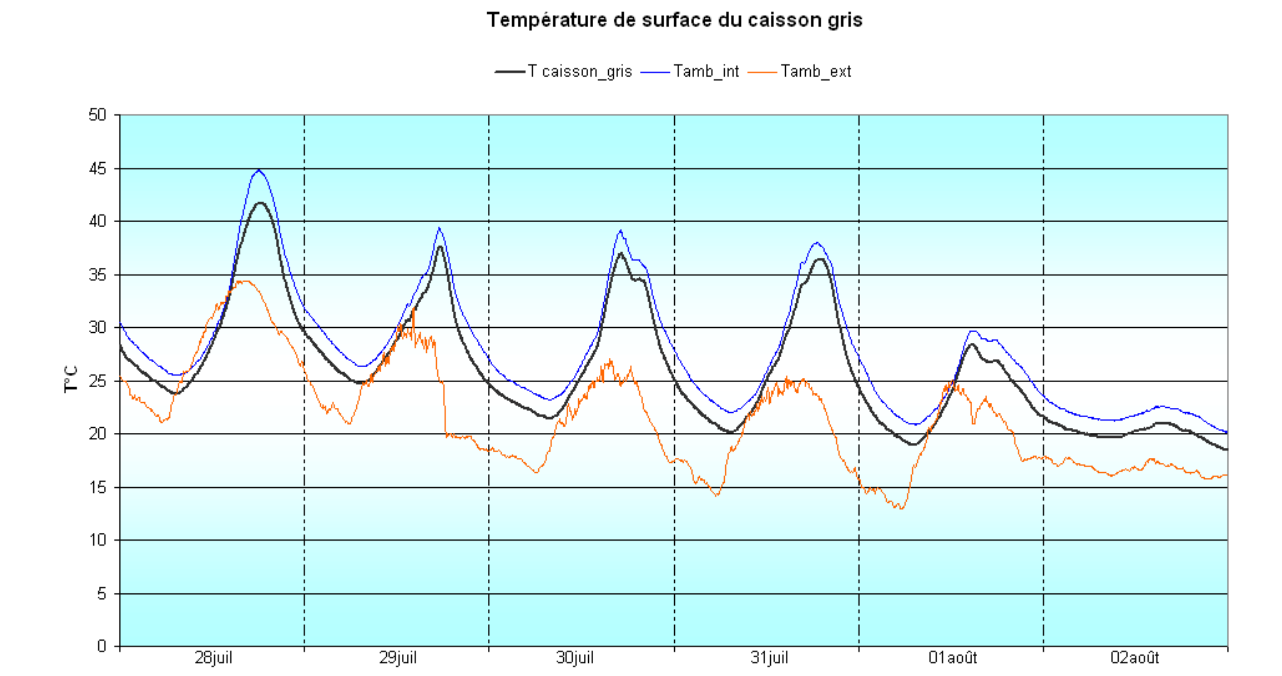


Figure C-2-17 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 28 juillet au 2 août.

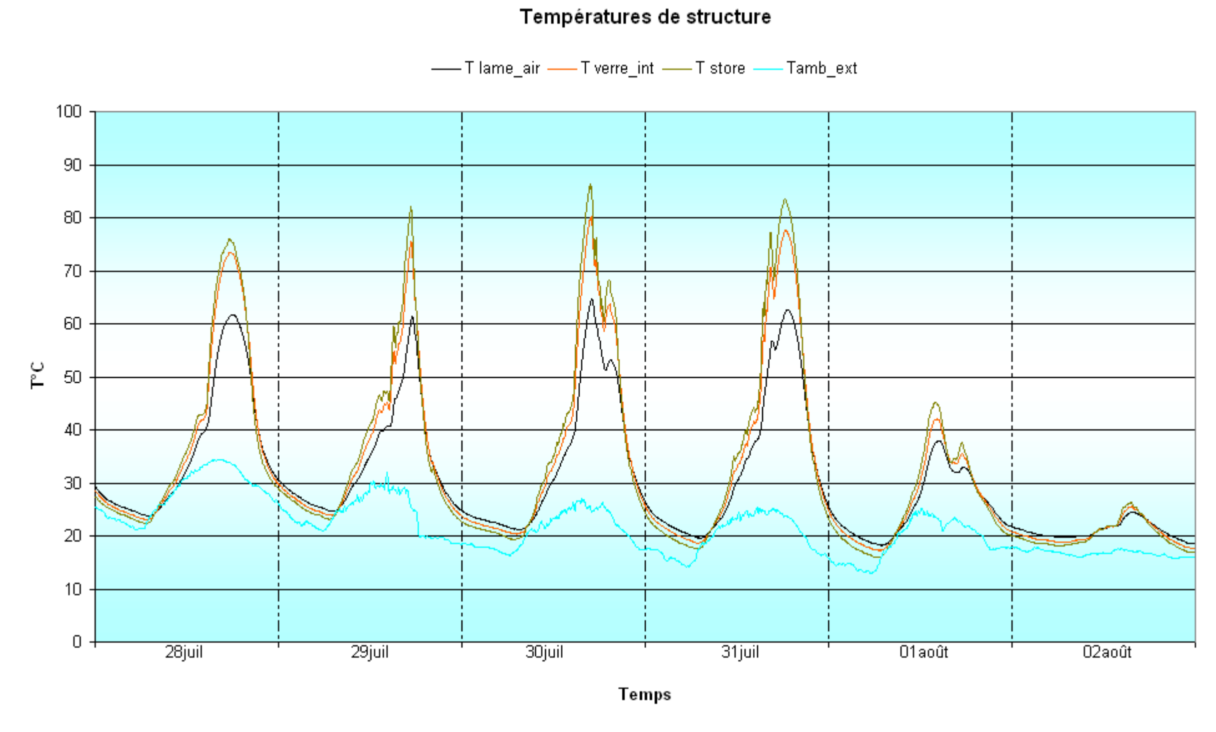


Figure C-2-18 : Evolution des températures de la structure de capteur du 28 juillet au 02 août.

C.2.4 Résultats de mesures du capteur « Vert » du 04 au 24 août 2005

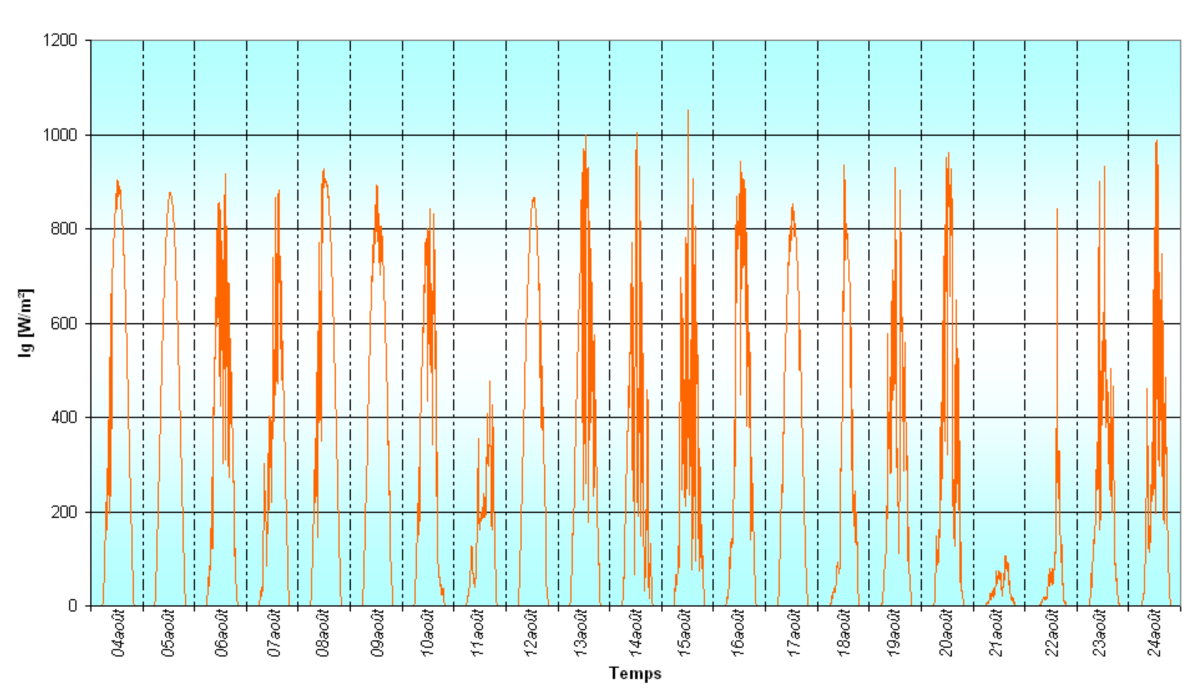


Figure C-2-19 : Eclairement énergétique horizontal global du 04 au 24 août aux GAIA.

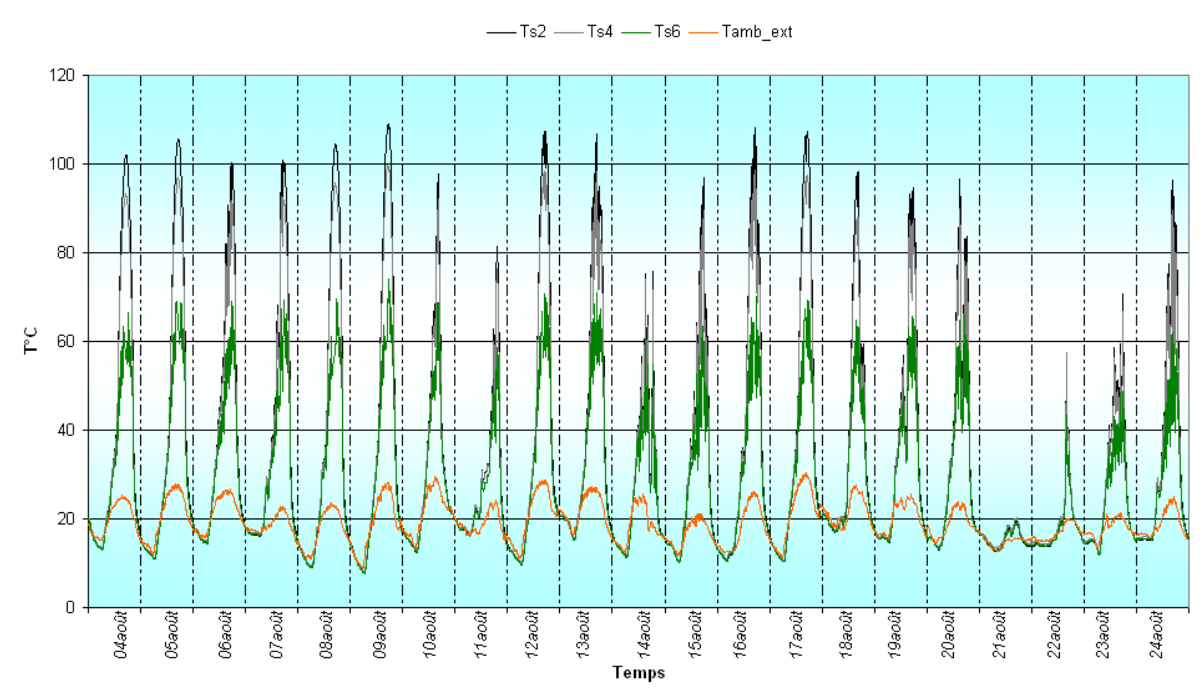


Figure C-2-20 : Evolution des températures des absorbeurs du 04 au 24 août.

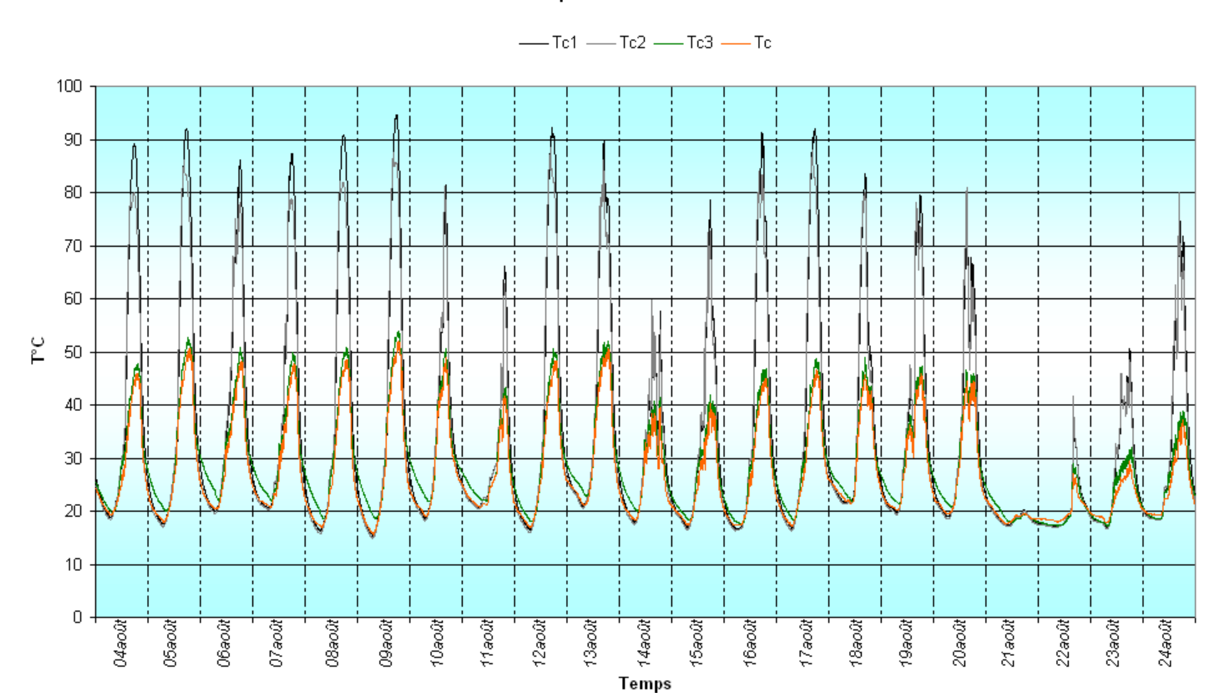


Figure C-2-21 : Evolution de la température du ballon de stockage du 04 au 24 août.

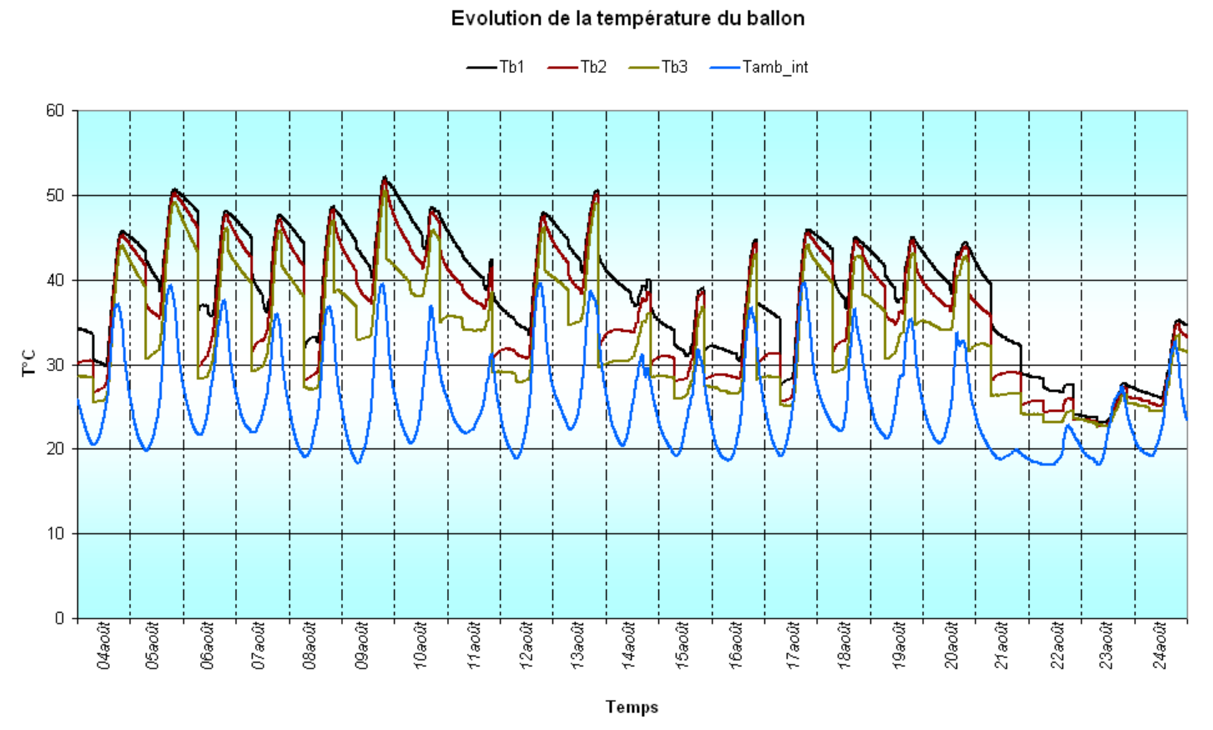


Figure C-2-22 : Evolution des températures dans les conduits du 04 au 24 août.

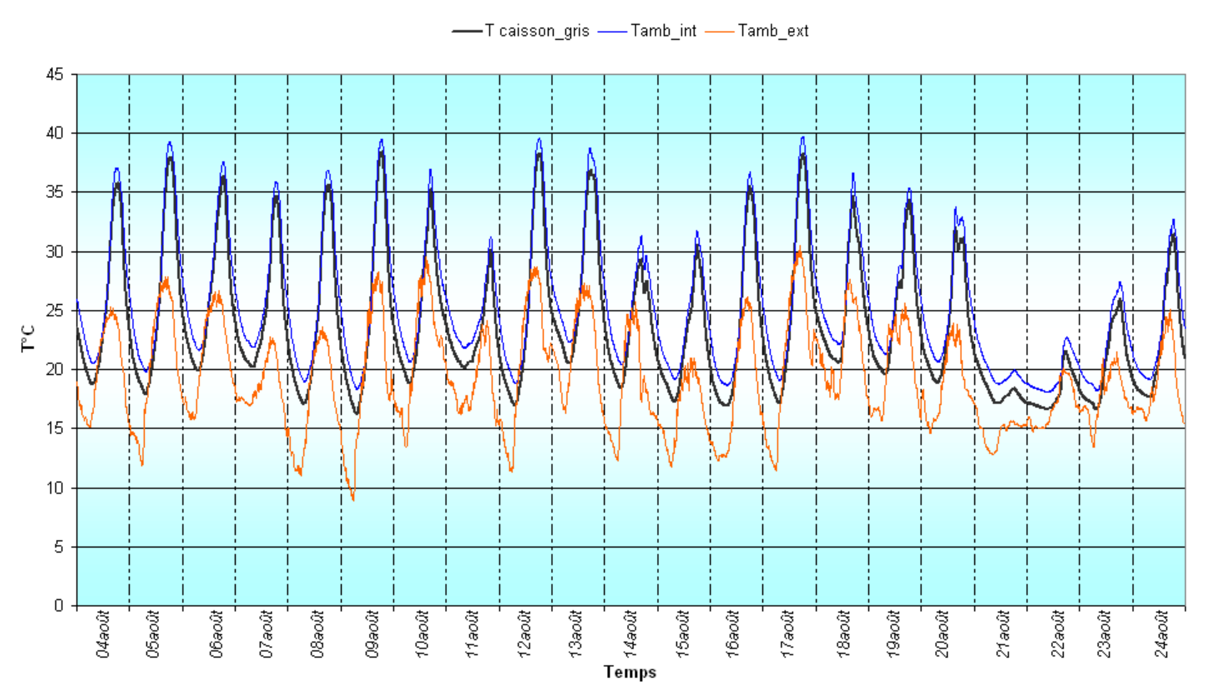


Figure C-2-23 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 04 au 24 août.

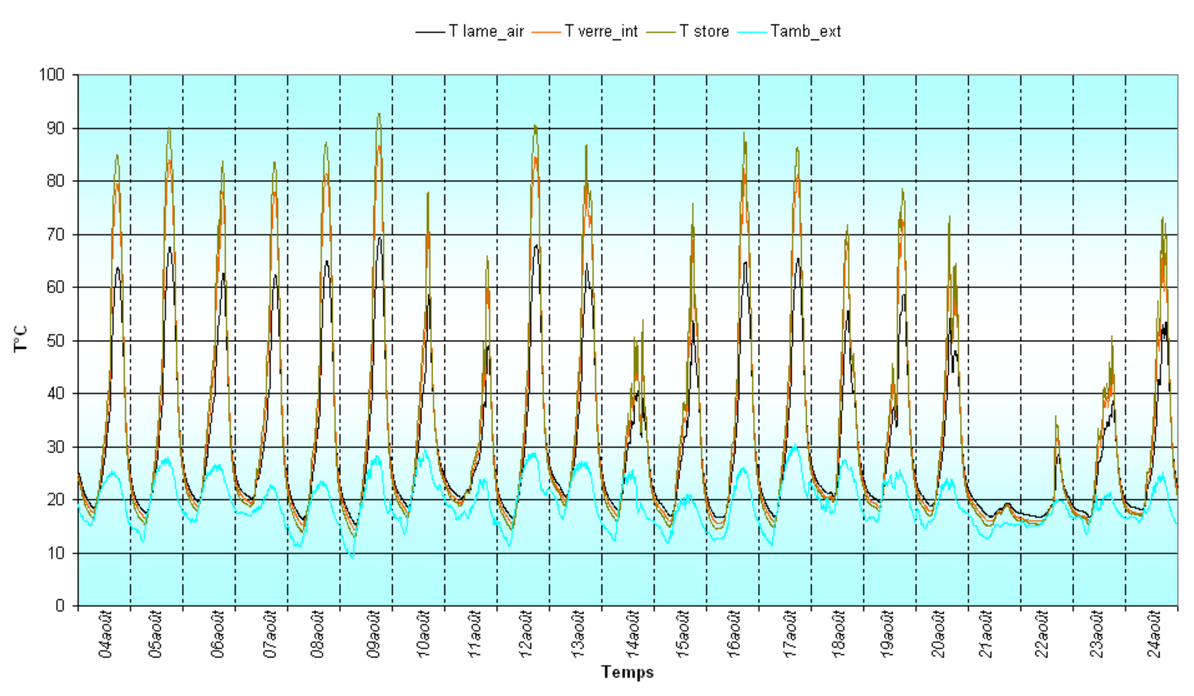


Figure C-2-24 : Evolution des températures de la structure de capteur du 04 au 24 août.

C.2.5 Résultats de mesures du capteur « Gris » du 31 août au 05 septembre 2005

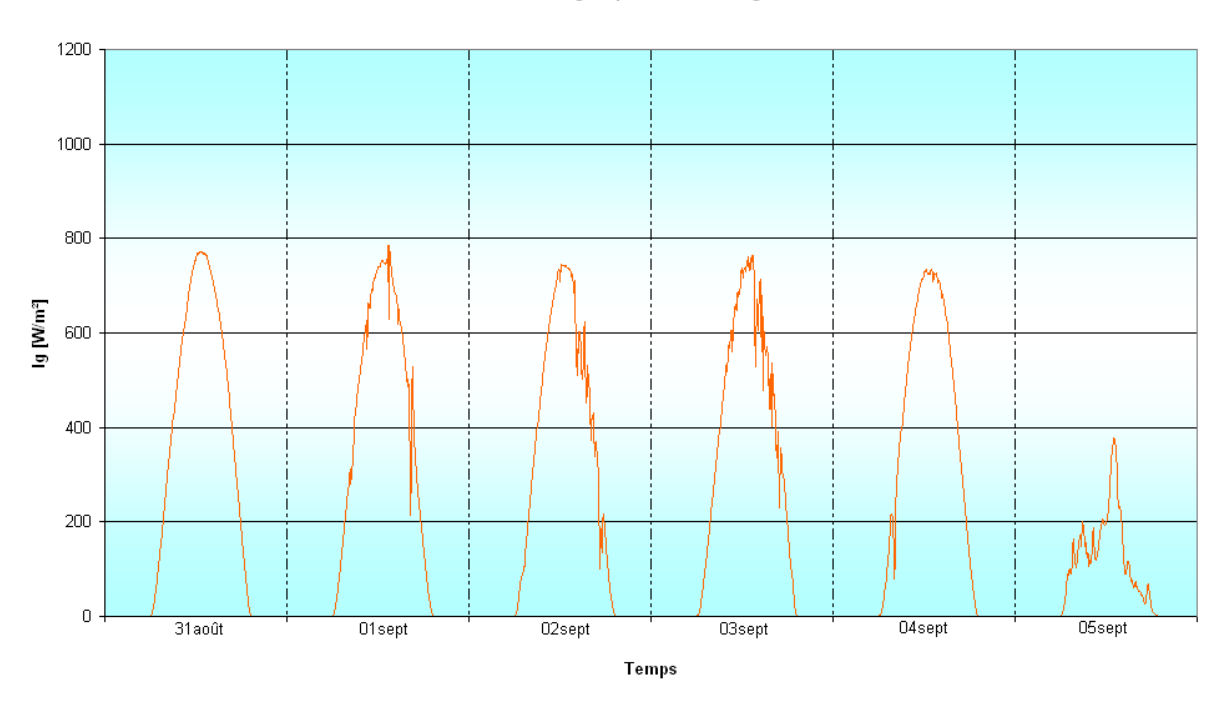


Figure C-2-25 : Eclairement énergétique horizontal global du 31 août au 05 septembre aux GAIA.

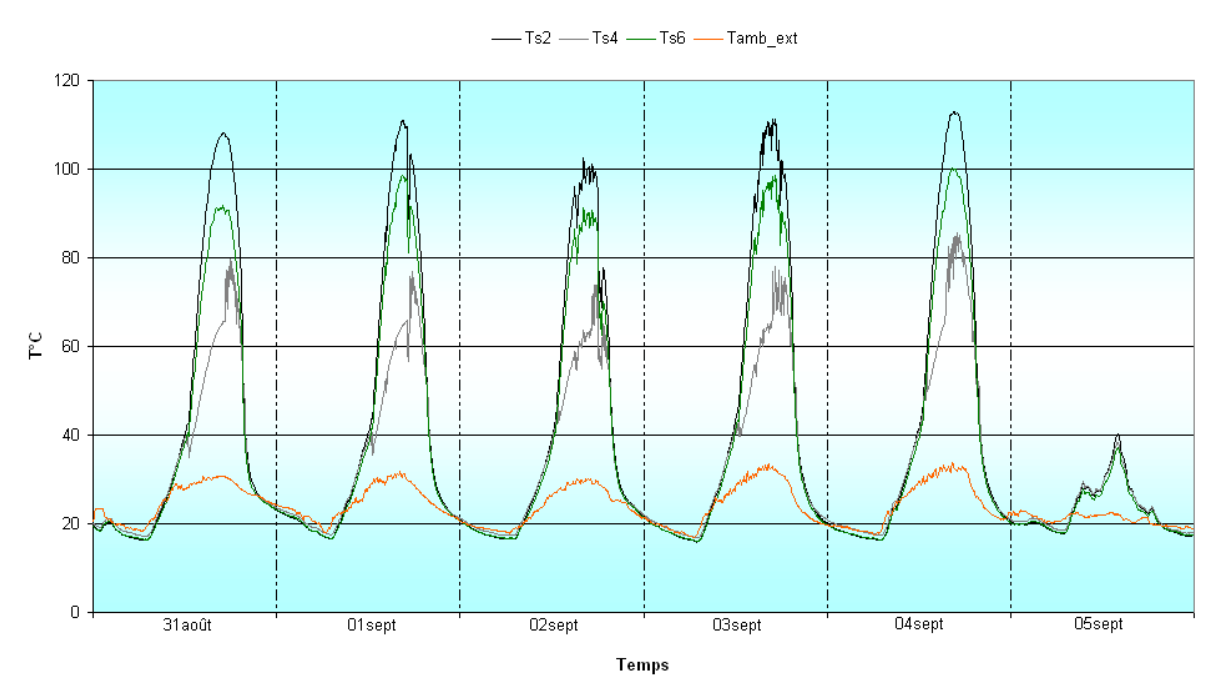


Figure C-2-26 : Evolution des températures des absorbeurs du 31 août au 05 septembre.

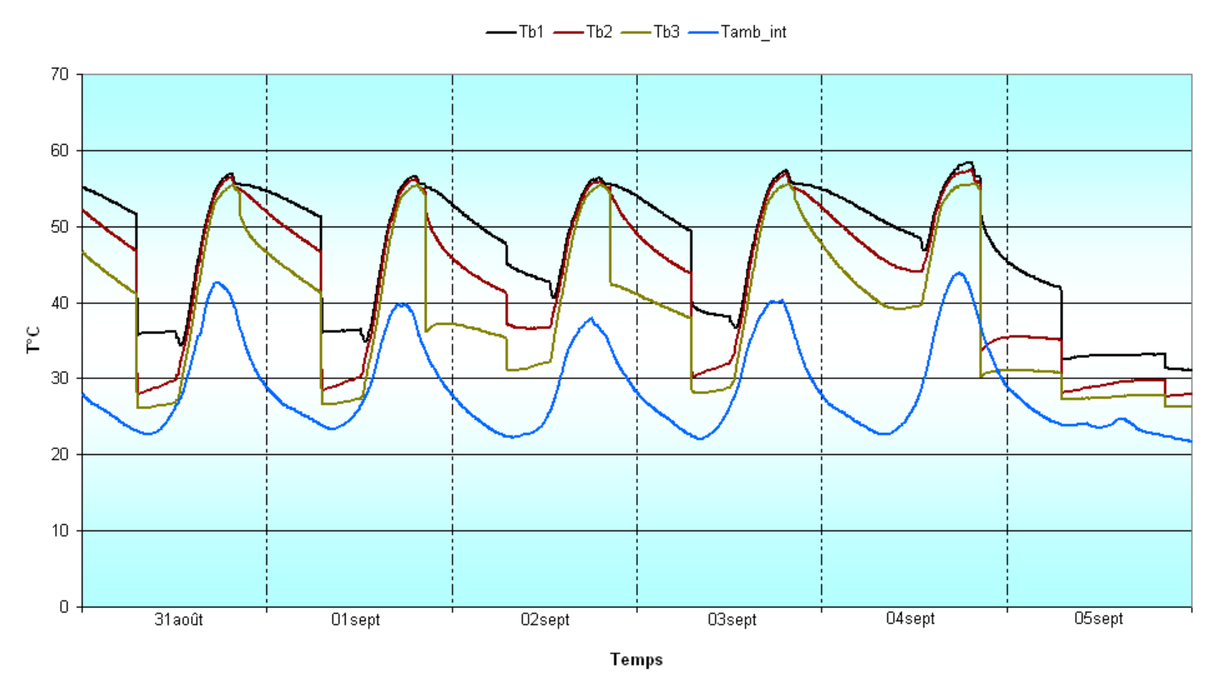


Figure C-2-27 : Evolution de la température du ballon de stockage du 31 août au 05 septembre.

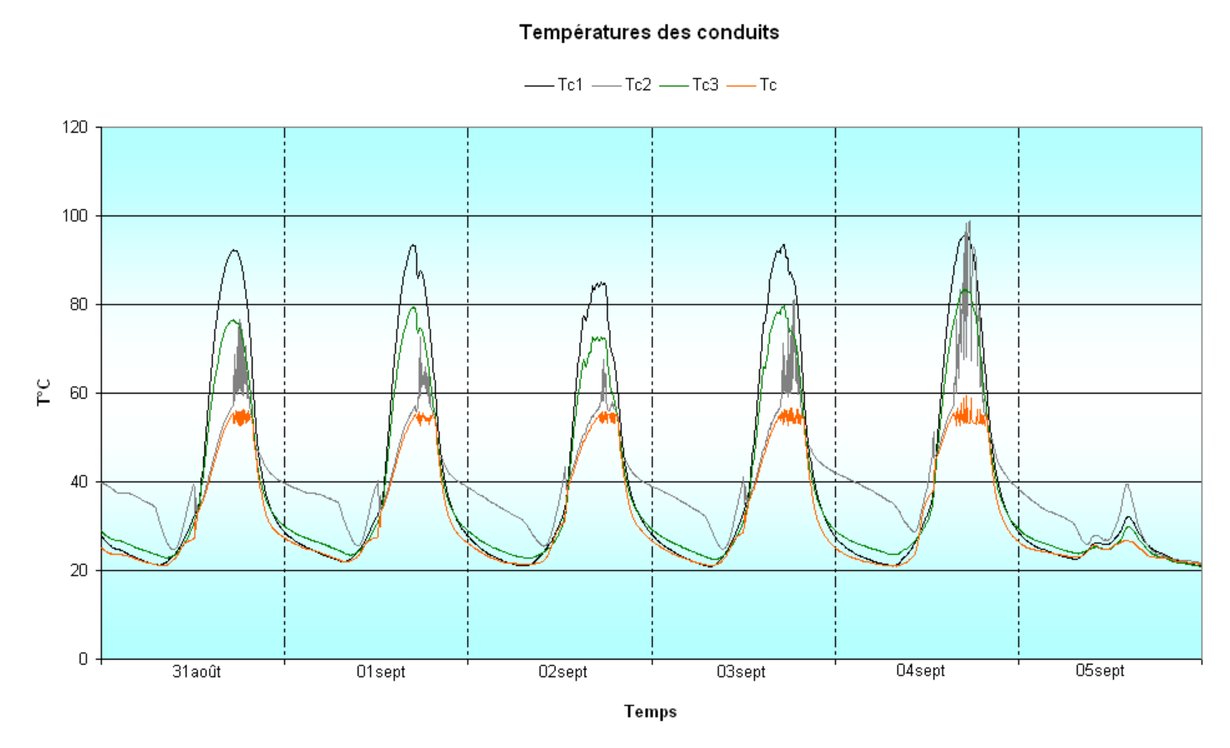


Figure C-2-28 : Evolution des températures dans les conduits du 31 août au 05 septembre.

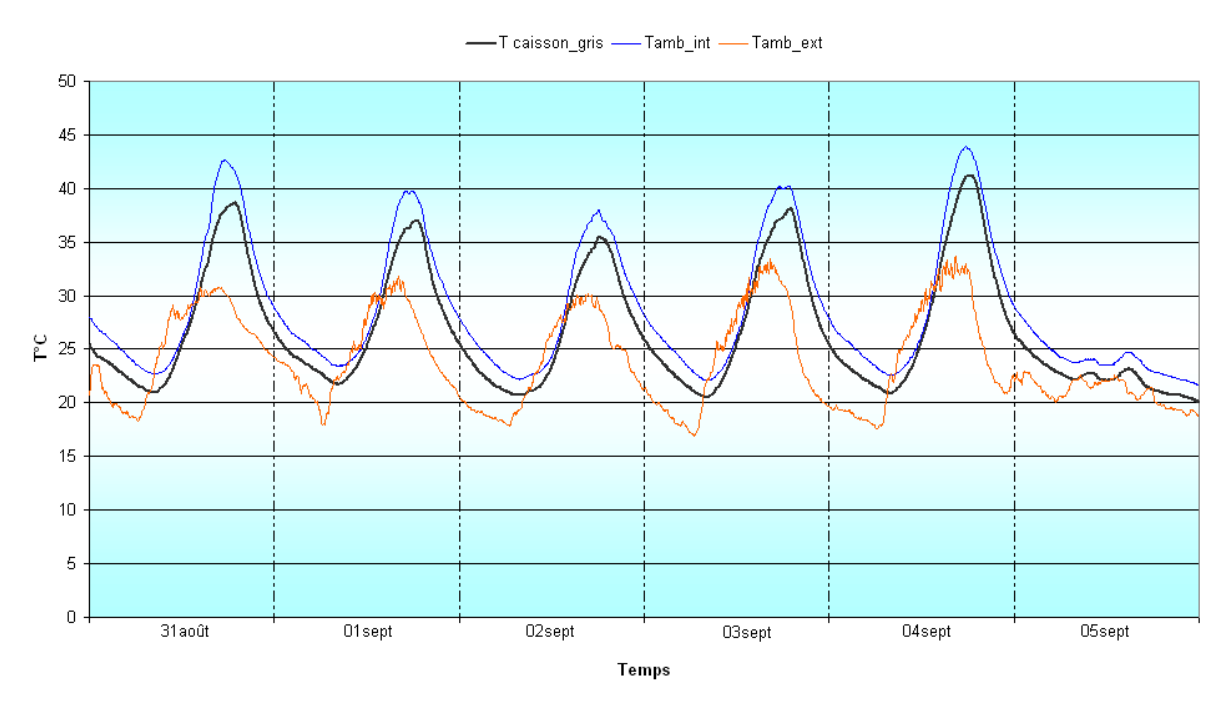


Figure C-2-29 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 31 août au 05 septembre.

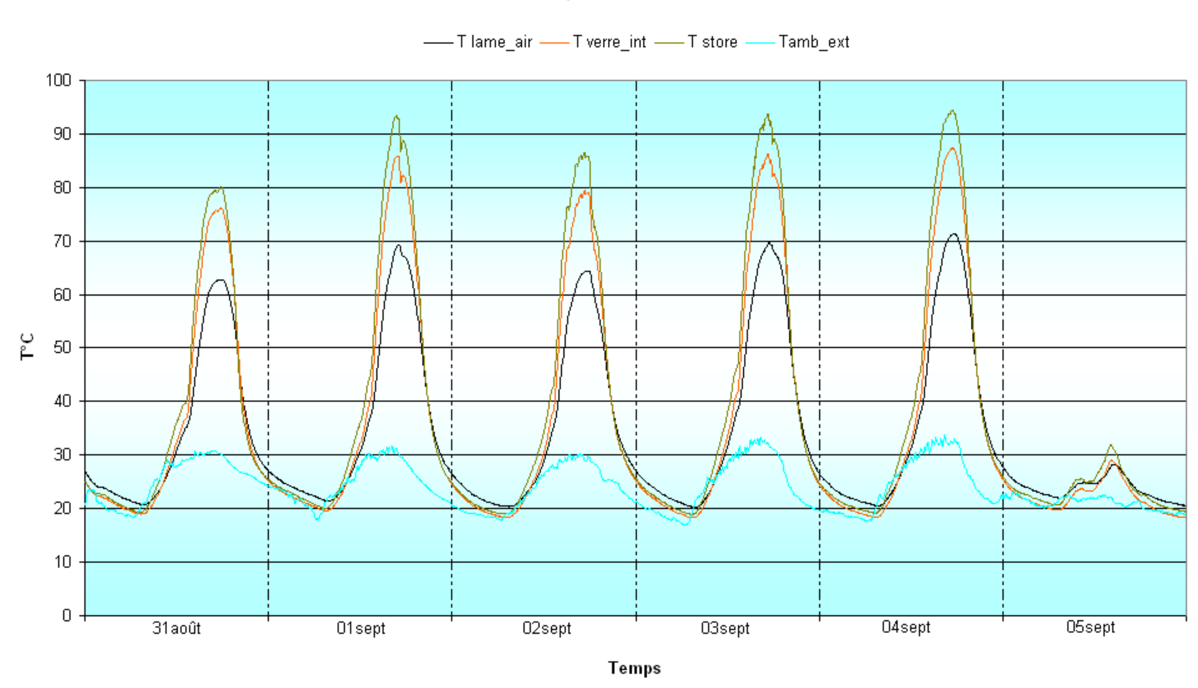


Figure C-2-30 : Evolution des températures de la structure de capteur du 31 août au 05 septembre.

C.2.6 Résultats de mesures du capteur « Gris » du 07 au 17 septembre 2005



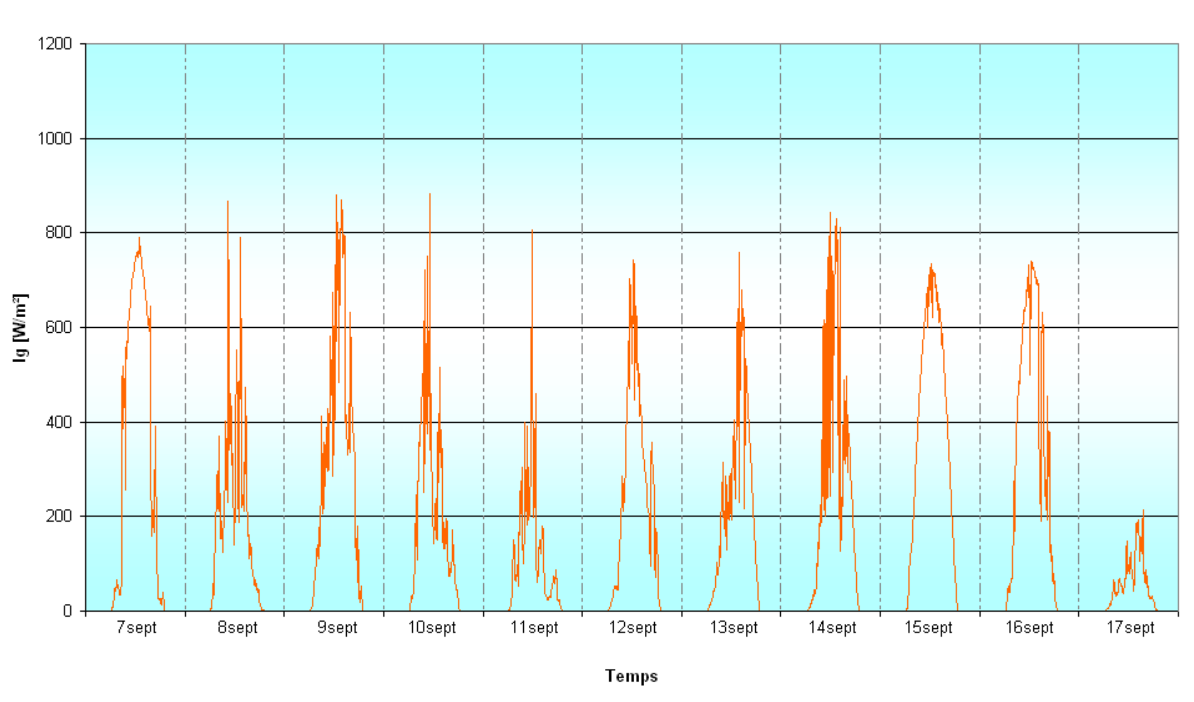


Figure C-2-31 : Eclairement énergétique horizontal global du 07 au 17 septembre aux GAIA.

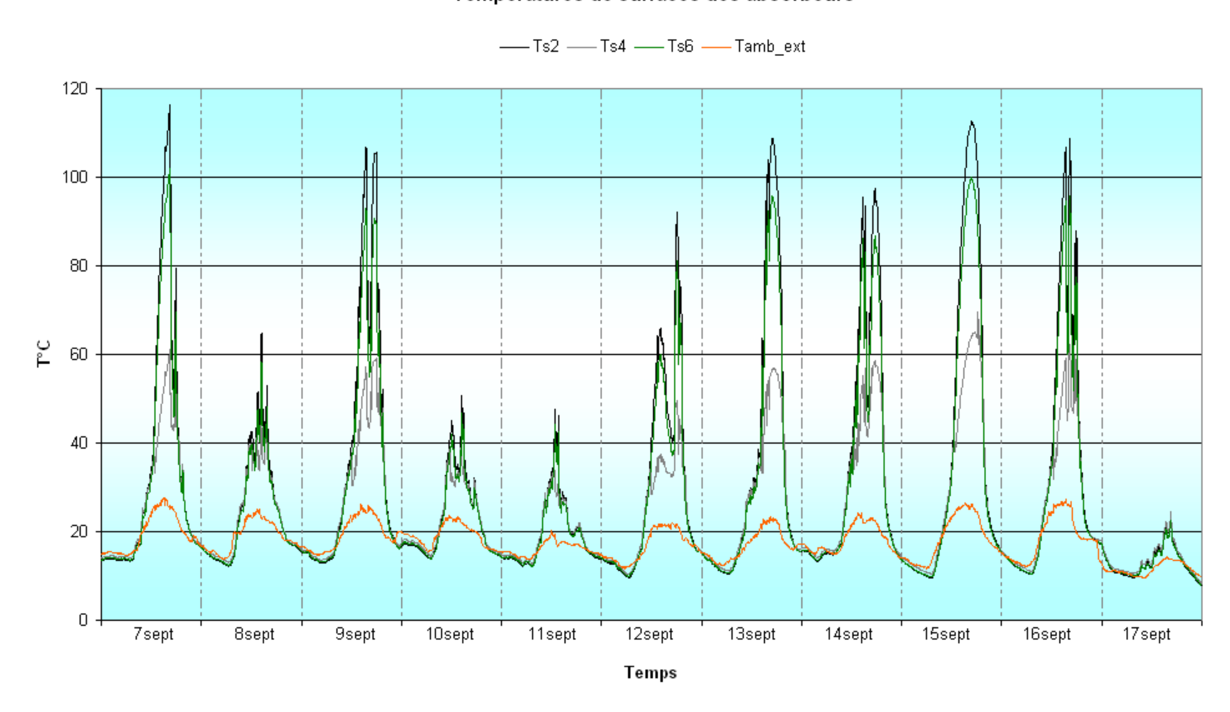


Figure C-2-32 : Evolution des températures des absorbeurs du 07 au 17 septembre.

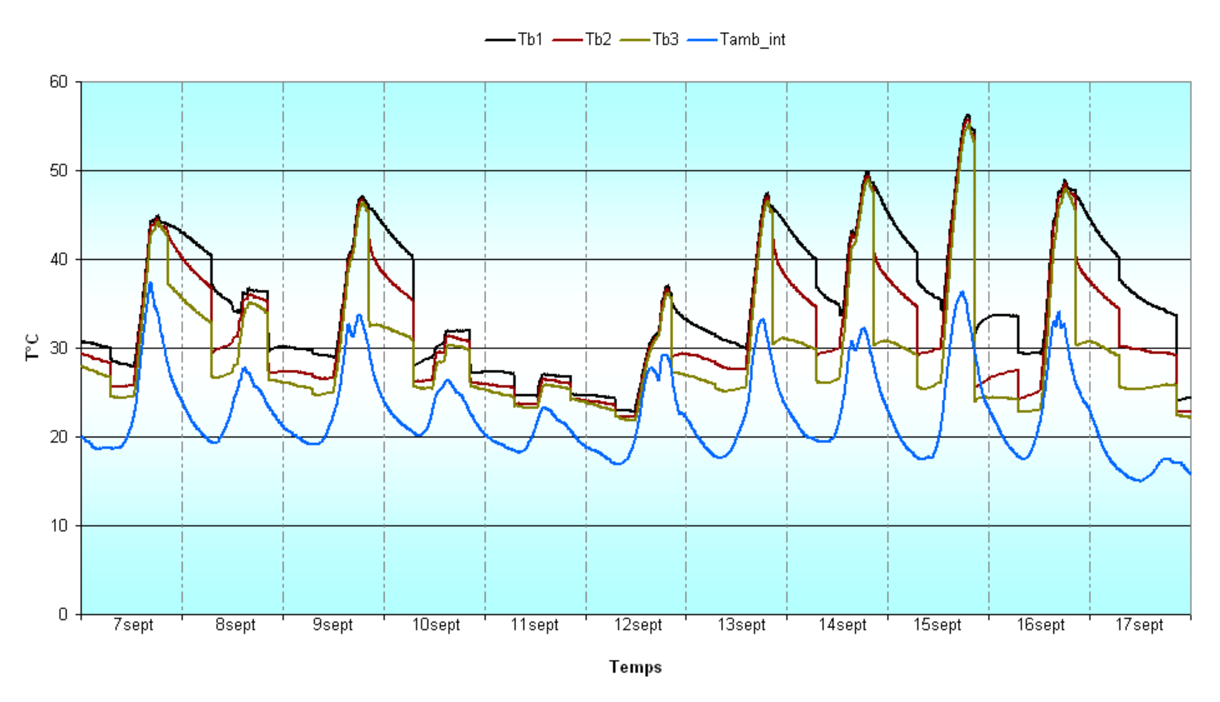


Figure C-2-33 : Evolution de la température du ballon de stockage du 07 au 17 septembre.

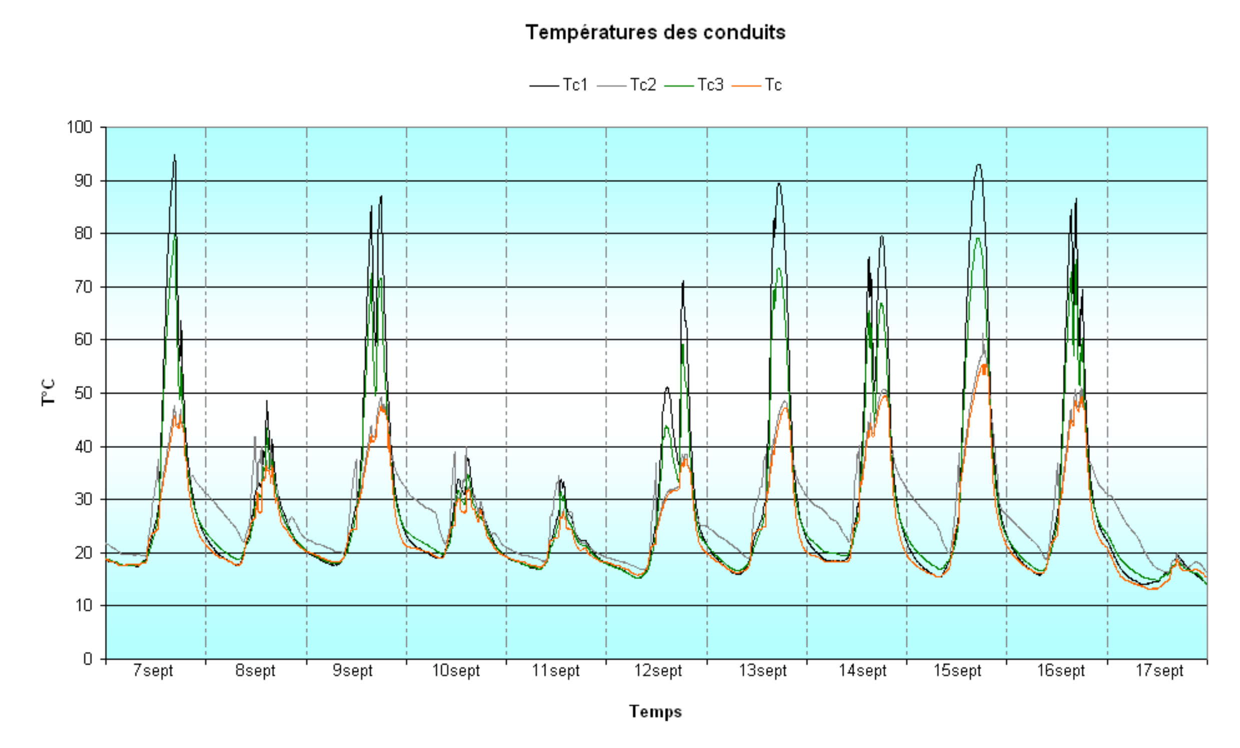


Figure C-2-34 : Evolution des températures dans les conduits du 07 au 17 septembre.

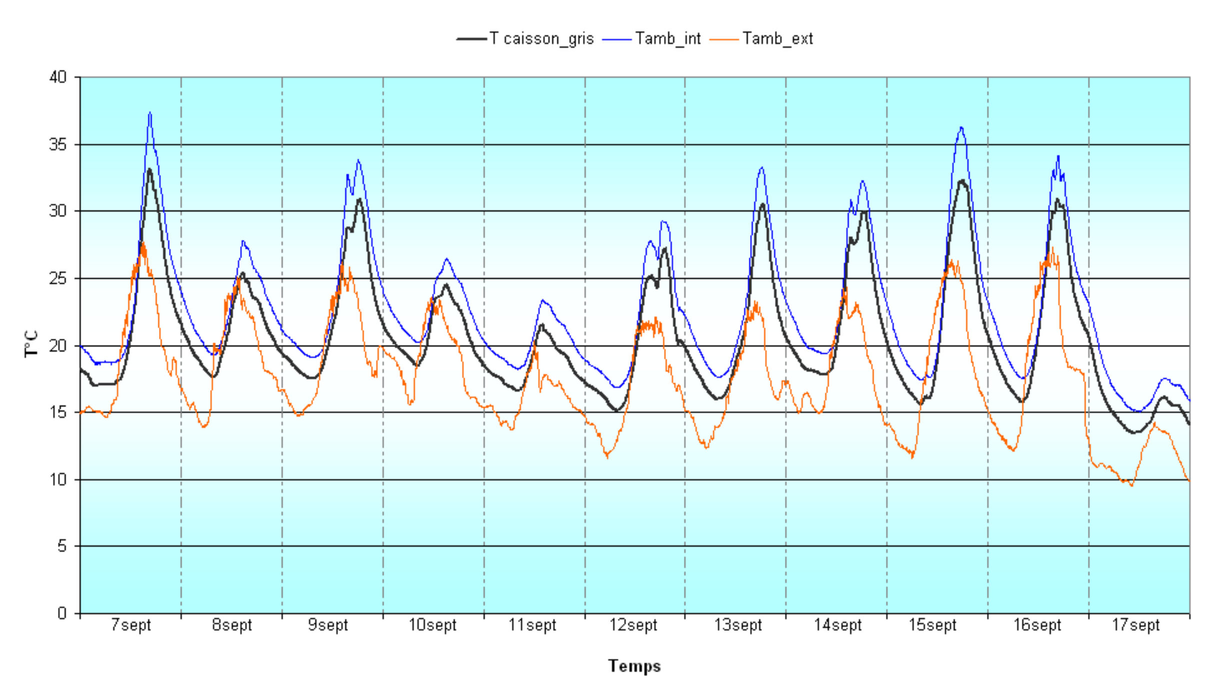


Figure C-2-35 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 07 au 17 septembre.

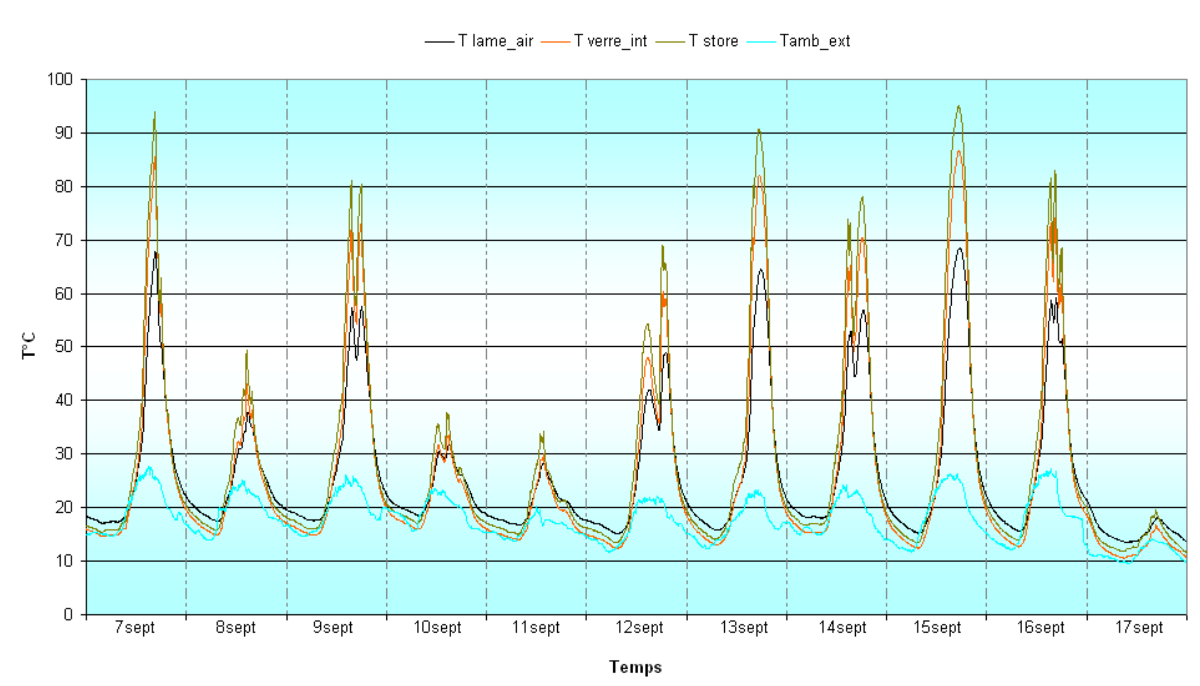


Figure C-2-36 : Evolution des températures de la structure de capteur du 07 au 17 septembre.

C.2.7 Résultats de mesures du capteur « Gris » du 18 septembre au 17 octobre 2005

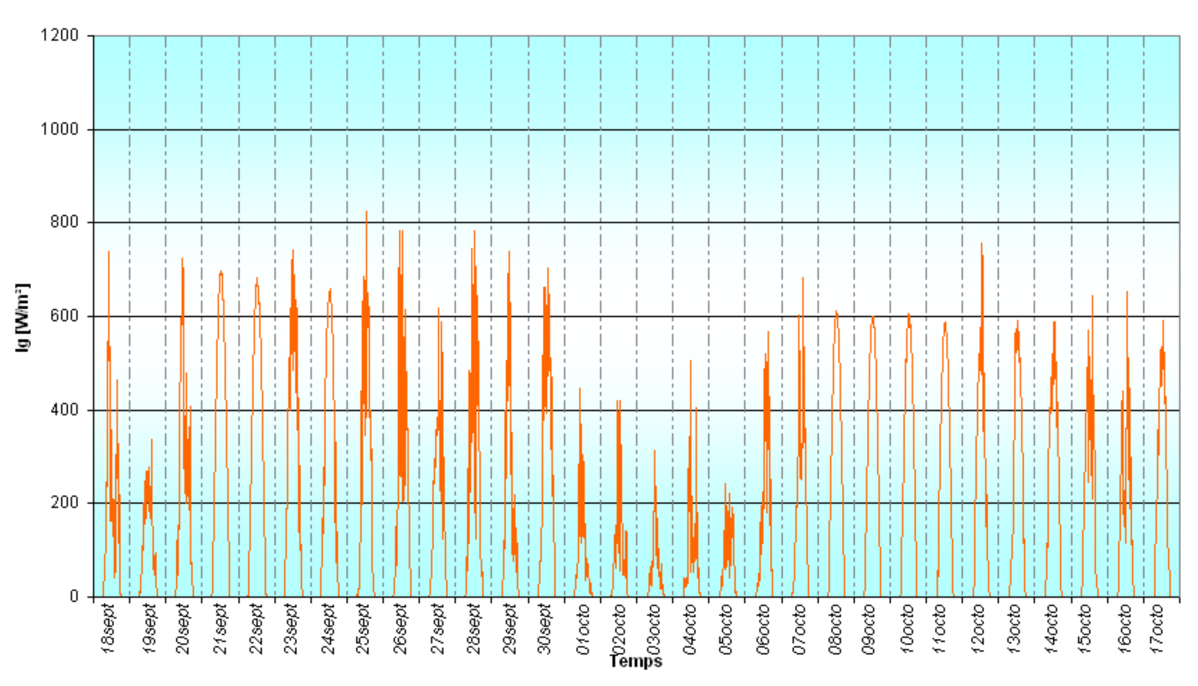


Figure C-2-37 : Eclairement énergétique horizontal global du 18 septembre au 17 octobre aux GAIA.

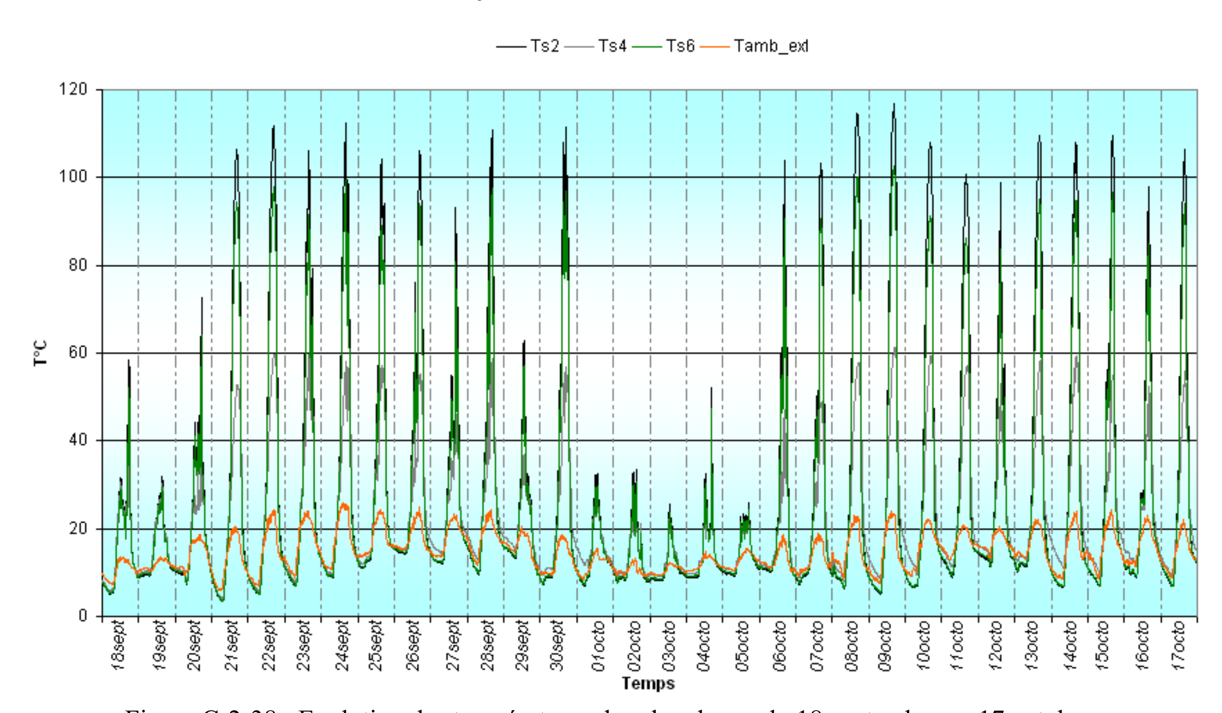


Figure C-2-38 : Evolution des températures des absorbeurs du 18 septembre au 17 octobre.

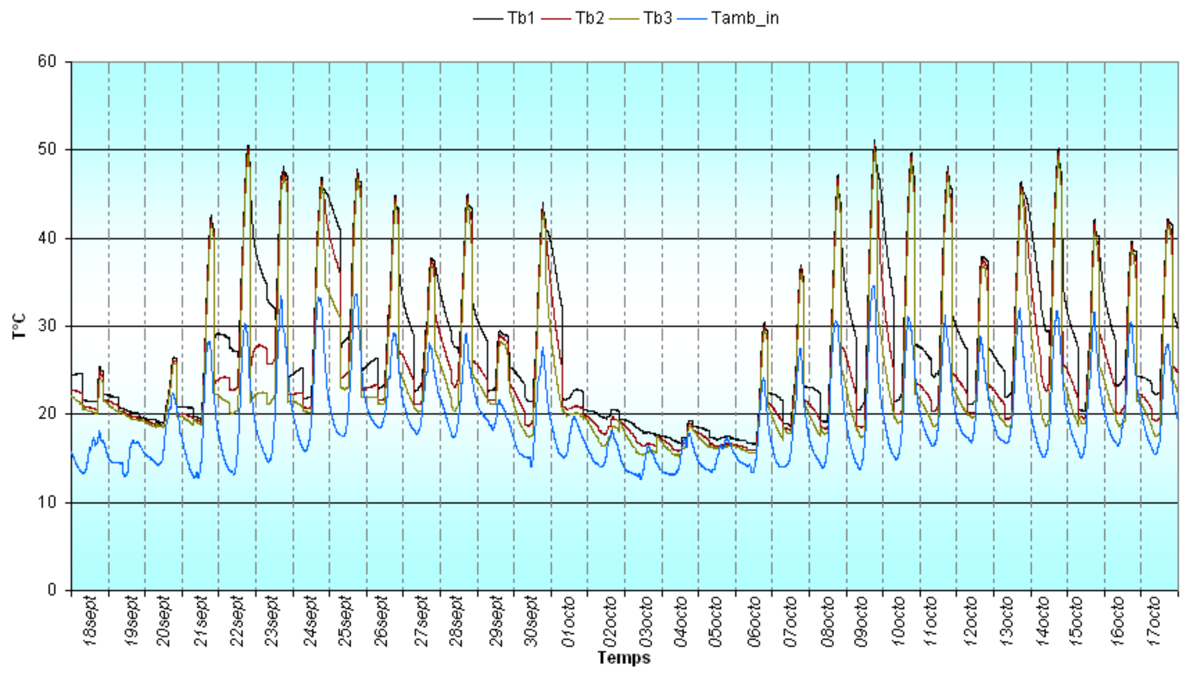


Figure C-2-39 : Evolution de la température du ballon de stockage du 18 septembre au 17 octobre.

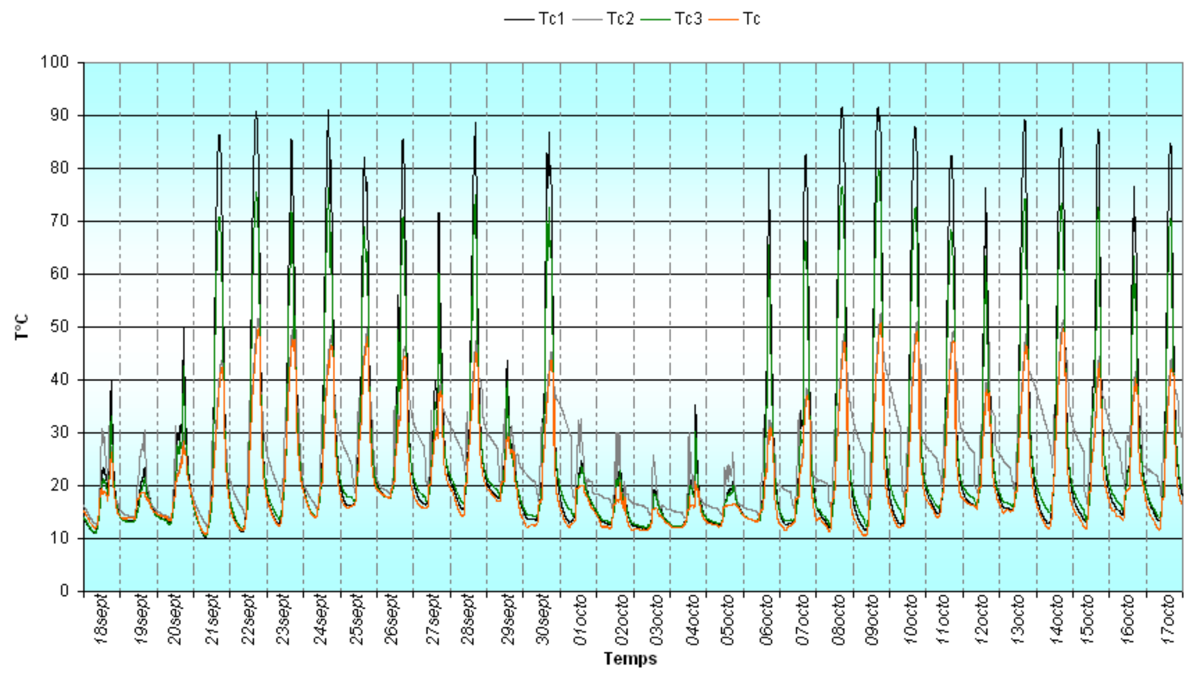


Figure C-2-40 : Evolution des températures dans les conduits du 18 septembre au 17 octobre.

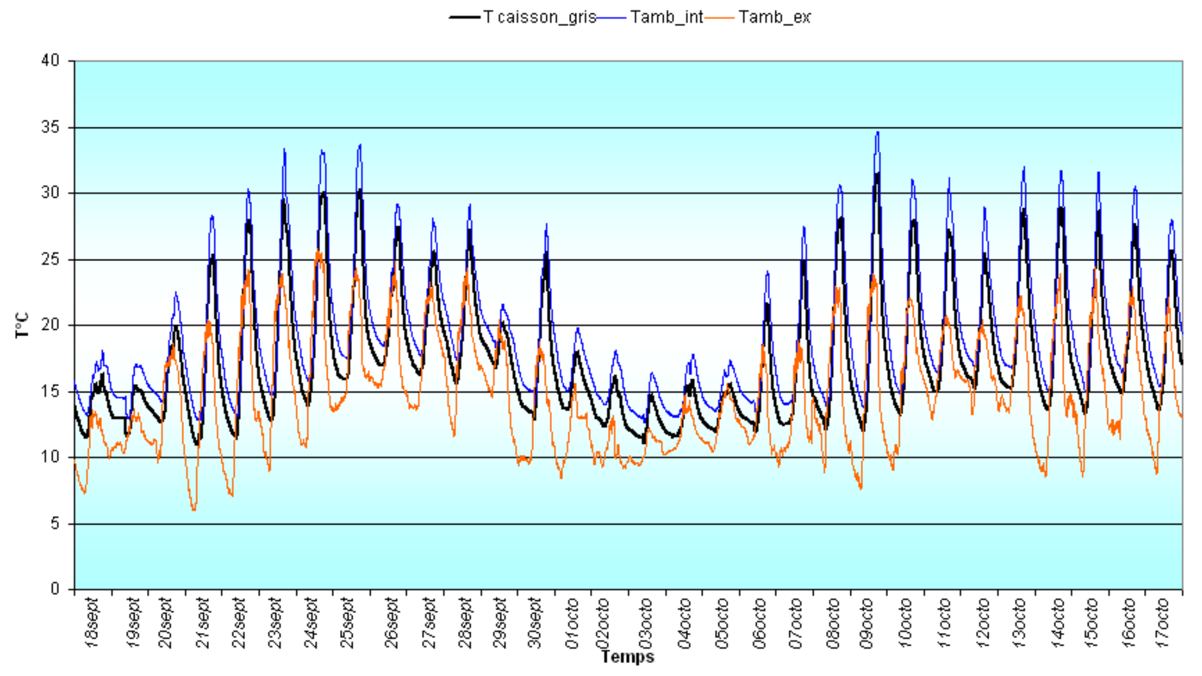


Figure C-2-41 : Evolution de la température de surface en arrière du coffre du capteur gris du 18 septembre au 17 octobre.

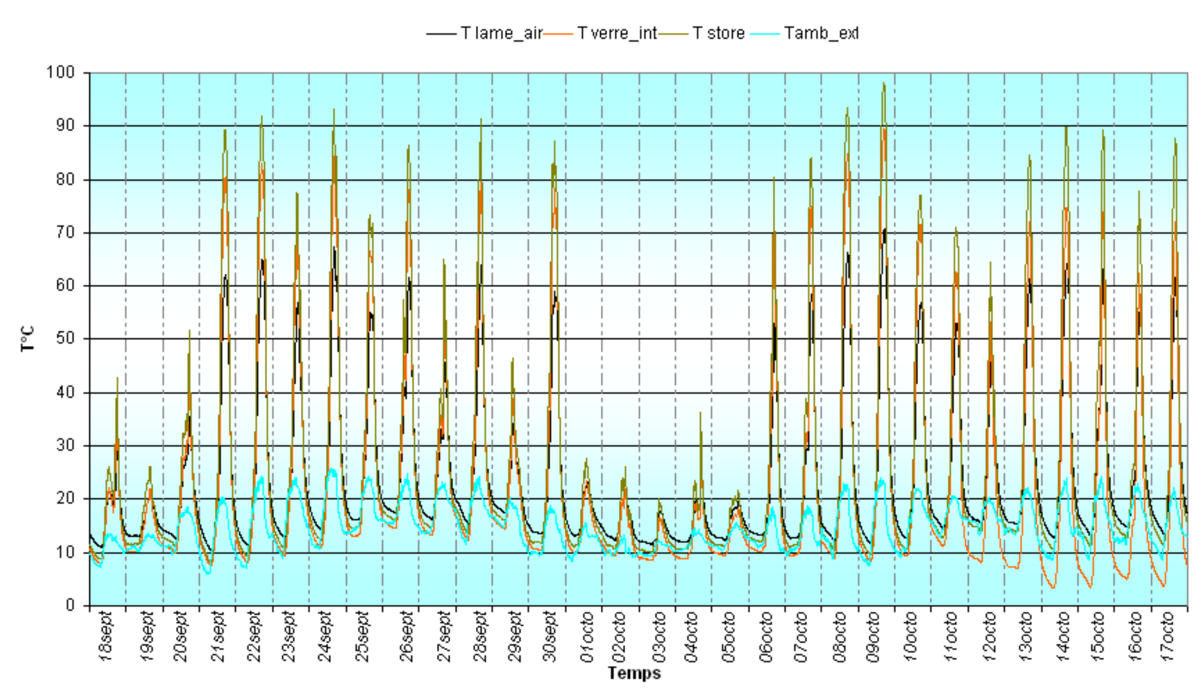


Figure C-2-42 : Evolution des températures de la structure de capteur du 18 septembre au 17 octobre.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : SALEM DATE de SOUTENANCE : 19 janvier 2007

Prénoms : Talal

TITRE :

Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2007-ISAL-0006

Ecole doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

Spécialité : Génie Civil

RESUME :

L'intérêt grandissant dans l'énergie solaire réside dans le fait qu'elle est une source inépuisable d'approvisionnement en énergie et son usage ne produit ni émission de polluants, ni déchets. Pendant les trente dernières années, les équipements solaires thermiques ont gagné en qualité et en durabilité, mais leur utilisation dans le bâtiment demeure freinée considérablement par une contrainte majeure: « leur intégration dans l'architecture du bâtiment ».
L'objectif de notre étude est double : d'une part conduire une analyse prospective destinée à identifier des pistes d'innovation dans l'intégration architecturale des systèmes solaires thermiques actifs, et d'autre part développer un outil numérique qui permet de calculer la performance énergétique des équipements solaires intégrés et l'impact de l'intégration sur l'ambiance intérieure du bâtiment. Dans un premier temps, une analyse de la problématique de l'intégration architecturale des composants solaires thermiques actifs dans le bâtiment à travers des exemples réalisés nous conduit à définir des principes d'intégration. Dans un second temps, nous développons un outil d'analyse prospective, baptisé SISBat, capable d'évaluer la qualité d'intégration des composants solaires dans le bâtiment et de proposer des perspectives d'évolution. Ensuite, nous développons un environnement de simulation de systèmes solaires intégrés dans le bâtiment. Bien que le système solaire soit considéré dans son ensemble, le travail de développement s'est plutôt focalisé le capteur intégré prenant en compte l'interaction capteur/bâtiment. Une fois qu'une proposition d'intégration solaire est développée avec SISBat, son comportement thermique et sa performance énergétique sont étudiés avec le modèle numérique développé afin de vérifier l'intérêt de la solution d'intégration. Enfin, une expérimentation à l'échelle réelle d'un système solaire de production d'eau chaude ayant des capteurs intégrés dans la façade d'un bâtiment expérimental permet non seulement d'étudier le comportement réel de capteurs solaires intégrés, mais aussi de pouvoir confronter les résultats des simulations numériques et les mesures expérimentales et évaluer la capacité du modèle numérique développé à décrire le comportement thermique de tels composants.

MOTS-CLES : Solaire thermique, intégration architecturale, procédés constructifs, prospective, modélisation, expérimentation

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire des Sciences de l'Habitat, Département Génie Civil et Bâtiment – URA CNRS 1652
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Directeur de thèse: MICHEL Pierre

Président de jury : J.J. ROUX

Composition du jury :
A. MOURTADA
D. MAYER
P. MICHEL
M. SANTAMOURIS
S. KHERROUF